



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



CAMILA DE JESUS MORAIS

**TENTATIVA DE ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO
COM ADIÇÃO DE POLÍMERO INDUSTRIAL**

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2018

CAMILA DE JESUS MORAIS

**TENTATIVA DE ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO
COM ADIÇÃO DE POLÍMERO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Sergipe – UFS, para o encerramento do
componente curricular e conclusão da
graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. DSc. Erinaldo Hilário
Cavalcante.

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2018

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Assinatura

Morais, Camila de Jesus

Tentativa de estabilização de um solo expansivo com adição de polímero industrial. / Camila de Jesus Moraes – 2018.

92 f. : il.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil, São Cristóvão, 2018.

Orientação: Erinaldo Hilário Cavalcante

- I. Universidade Federal de Sergipe/Sergipe. CDS.
- II. Título

CAMILA DE JESUS MORAIS

**TENTATIVA DE ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO
COM ADIÇÃO DE POLÍMERO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Sergipe – UFS, para o encerramento do
componente curricular e conclusão da
graduação em Engenharia Civil.

Aprovada em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante – Universidade Federal de Sergipe
(Presidente – Orientador)

Nota: _____

Prof. MSc. Demóstenes Cavalcante Júnior
(1º Examinador)

Nota: _____

Prof. MSc. Carlos Rezende Cardoso Júnior
(2º Examinador)

Nota: _____

*Aos meus pais, Josefa e Almeida, por serem minha maior fonte de perseverança e
motivação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda benção concedida desde o meu nascimento, por nunca me desamparar e dando-me força e discernimento para superar todos os obstáculos.

Aos meus pais por todo apoio, dedicação, cuidado, carinho e amor, que mesmo morando em outro estado foram sempre presentes, não medindo esforços para me ver bem. A minha mãe por sempre ser minha melhor amiga, confidente e companheira, além de me apoiar em qualquer eu seja minha decisão.

Ao meu companheiro de todos os dias, Alfredo Júnior, por todo incentivo, preocupação, cuidado, atenção, carinho e paciência.

Ao Prof. Erinaldo Hilário Cavalcante, por toda orientação e dedicação desde o início da graduação, em especial durante o desenvolvimento do TCC, dando total apoio e suprimentos para pesquisas e conhecimento sobre solos expansivos.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, Washigton Santos e Willami Santos, que além de técnicos e professores, foram como pais durante todo o período que fiquei no GEOPAV. Obrigado pela paciência, apoio, conselhos e conhecimento transmitido.

Aos professores do Laboratório de Física, Campus Itabaiana, pelo apoio.

Aos professores Guilherme Bravo e Victor Lourenço, obrigado pelo apoio e conhecimento compartilhado.

À todos os professores, pela dedicação em compartilharem os seus conhecimentos da melhor forma possível.

Ao meu parceiro, da faculdade pra vida, Carlos Eduardo, sabe o quanto sou grata a você por todo apoio, conselho, preocupação e paciência, por me ajudar a vencer os dias de luta sempre de cabeça erguida e sorrindo. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório Clayton, Débora, Rômulo, Kharine, Thauane, Jéssica e Jorge, obrigado por todo auxílio e compartilharem comigo suas experiências.

Aos meus colegas de curso e profissão, Saulo, Taise, Joyce, Luis Phillipe, Luan, Alex, Wallace, Valfran, Daniela e Érika por todo convívio durante a graduação, conversas, alegrias e tristezas compartilhadas, noites mal dormidas e trabalhos infinitos. Obrigado por tudo!

E a todos que me ajudaram a tornar o meu sonho realidade, muito obrigado!

Quem acredita sempre alcança.

Renato Russo

Resumo

Quando o solo possui propriedades peculiares, e estas não forem devidamente investigadas, o resultado pode ser a ocorrência de danos estéticos e até estruturais à edificação. É o caso, por exemplo, dos solos expansivos, que se caracterizam pela mudança volumétrica (expansão e retração) causada por alterações em sua umidade. São solos responsáveis, muitas vezes, por diversas patologias, tais como fissuras, trincas e tombamentos, devido ao seu movimento expansivo. O presente trabalho tratou de analisar uma amostra de solo expansivo extensivamente encontrado na zona de expansão norte da região metropolitana de Aracaju, situada no Loteamento Santa Cecília, em Nossa Senhora do Socorro - Sergipe, tendo como objetivo uma tentativa de estabilização química. Para tanto, foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg, compactação, ISC, RCS, expansão livre e pressão de expansão. Todos os ensaios, com cura e sem cura, indicaram alta plasticidade (IP máximo de 39) e alto grau de expansão para o solo natural, com 19% de expansão livre e 665,5 kPa de pressão de expansão. Para a tentativa de estabilização, foram realizados os mesmos ensaios em misturas solo-polímero com os teores arbitrados de 5%, 6% e 7%. Os resultados obtidos não foram satisfatórios, tendo-se observada uma discreta redução da fração argilosa e do valor do IP. Houve diminuição no valor do peso específico máximo seco e na umidade ótima, enquanto que os valores de expansão no ISC não atenderam às especificações rodoviárias. A pouca redução na expansão livre e na pressão de expansão do solo com o emprego do polímero provam que esse produto aglomerante não alterou de forma significativa o comportamento expansivo do solo.

Palavras – Chave: Solo natural, polímero industrial, tentativa de estabilização.

Abstract

When the soil has peculiar properties, and these are not well investigated, it can cause aesthetic and structural damages in the period of post occupation. This is the case, for example, of the expansive soils, which are characterized by the volumetric change (swell and shrinkage) caused by changes in their moisture. Responsible for various pathologies, such as fissures, cracks and falls, due to its expansive movement. The swell is due to the intrinsic properties, referring to the nature and arrangement of the particles, and extrinsic, related to the environmental conditions and states of tension. This research studied a disturbed sample of expansive soil collected in Santa Cecília Loteamento, in Nossa Senhora do Socorro – Sergipe. Using granulometric tests, Atterberg limits, compaction, ISC, RCS, free swell and swell pressure. All the tests, with cure and without cure, indicated high plasticity (IP equal to 39) and high degree of swell to the natural soil, which reached around 19% and swell pressure 665.5 kPa. For the stabilization attempt, the same tests were performed in soil-polymer mixtures with the contents of 5%, 6% and 7%. The results obtained were not satisfactory. There was a small reduction of the clay fraction and IP; displacement of the compaction curve (reduction of specific maximum dry weight and optimum moisture); Expansion fees in ISC that do not meet road specifications, for example; little reduction of the free swell and swell pressure, with the content of 5% of polymer.

Keywords: Soil natural, industrial polymer, attempt of extabilization.

Lista de Figuras

Figura 1 - Folhas de sílica e alumínio.	5
Figura 2 - Esquema estrutural de base de uma caulinita.	6
Figura 3 - Esquema estrutural da muscovita. A estrutura da illita é semelhante.	7
Figura 4 - Esquema estrutural de base de uma montmorilonita.	8
Figura 5 - Representação esquemática da estrutura típica de uma montmorilonita.	9
Figura 6 - Aspectos de um solo expansivo em período de estiagem.	10
Figura 7 - Representação do teor de água versus a profundidade para: (a) Solo A; (b) Solo B..	10
Figura 8 - a) Aspecto geral da vegetação no início do período chuvoso e b) macroestrutura do solo na estação seca, solos.	12
Figura 9 - a) Estação seca: fendas com queda da argila. b) Estação úmida: fechamento das fendas e descolamento da argila.	12
Figura 10 - Danos nas edificações causados por solos expansivos.	13
Figura 11 - A difração de raios-X do ponto de vista de Bragg.	16
Figura 12 - Classificação da expansividade de argilomineirais e materiais argilosos.	20
Figura 13 - Ensaio endométrico múltiplo.	22
Figura 14 - Densidade seca x teor de água.	24
Figura 15 – Mapa do Estado de Sergipe.	29
Figura 16 - Local de coleta da amostra – Loteamento Santa Cecília, Nossa Senhora do Socorro.	30
Figura 17 - Coleta da amostra de solo a ser estudado.	31
Figura 18 - Amostra em bandejas para secagem.	32
Figura 19 - Amostra de solo destorroado.	32
Figura 20 - Amostra do polímero industrial e do redutor de plasticidade.	34
Figura 21 - Organograma das etapas para a realização da pesquisa.	35
Figura 22 - Preparação da mistura do solo com a adição do polímero industrial.	36
Figura 23 - Peneiramento e Sedimentação.	37
Figura 24 – Determinação da densidade real.	37
Figura 25 - Execução do ensaio de Limite de Liquidez.	38
Figura 26 - Execução do ensaio de Limite de Plasticidade.	39
Figura 27 - Aeração da mistura solo-polímero para a execução do ensaio.	40
Figura 28 - Execução do ensaio de compactação.	40
Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova.	41
Figura 30 - Corpos de prova imersos em água.	41
Figura 31 - Corpos de prova em processo de cura em câmara úmida.	42
Figura 32 - Prensa mecânica manual para execução do ensaio.	42
Figura 33 - (a) Preparação da mistura; (b) Repartição da amostras em pequenas sacolas plásticas para moldagem dos CPs; (c) moldagem dos CPs de RCS.	43
Figura 34 - CPs em processo de cura em câmara úmida.	43
Figura 35 - Rompimento dos CPs (a) com cura e (b) sem cura; (c) CPs rompidos.	44
Figura 36 – (a) Preparação da célula; (b) Moldagem do CP; (c) Colocação do CP na célula e (d) Colocação da célula na prensa para execução do ensaio.	45
Figura 37 – (a) Preparação do porta amostra de silício não orientado; (b), (c) e (d) Colocação e espalhamento do solo no porta amostra; (e) Solo devidamente espalhado; (f) Magazine (Suporte de amostras).	46
Figura 38 - Curva granulométrica do solo natural.	47
Figura 39 - Curva de compactação do solo natural – Ensaio 01.	48
Figura 40 - Curva de compactação do solo natural – Ensaio 02.	49
Figura 41 - Resultado do ensaio de expansão livre para solo natural.	49

Figura 42 - Resultado do ensaio de pressão de expansão para o solo natural.	50
Figura 43 – Representação dos difratogramas obtidos para o solo natural.	51
Figura 44 - Curvas granulométricas – Adição polimérica de 5%, 6% e 7%.	52
Figura 45 - Resumo granulométrico – Adição polimérica de 5%, 6% e 7%.	53
Figura 46 - Curvas de compactação: misturas solo-polímero.	55
Figura 47 - Valores obtidos no ensaio de ISC para solo puro e misturas, sem cura.	56
Figura 48 -Valores obtidos no ensaio de ISC para solo puro e misturas, com cura.	57
Figura 49- Resultado do ensaio de expansão livre para SP + 5% Pol.	58
Figura 50 - Resultado do ensaio de pressão de expansão para SP + 5% Pol.	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fatores que influenciam na expansão dos solos.....	13
Tabela 2 - Fatores relacionados as condições do meio ambiente.....	14
Tabela 3 - Fatores relacionados a estados de tensão.	14
Tabela 4 - Resumo granulométrico – Solo natural.....	47
Tabela 5 – Massa específica real dos materiais estudados.....	53
Tabela 6 - Limites de Atterberg e classificação das misturas.	54
Tabela 7 - Resultados dos parâmetros de compactação.	54
Tabela 8 - Resultados do ensaio de ISC, sem cura e com cura.	56
Tabela 9 - Resultados do ensaio de RCS, sem cura e com cura.....	57

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	4
2.1 Solos Expansivos	4
2.2 Principais argilominerais formadores dos solos expansivos	5
2.2.1 Caulinita	6
2.2.2 Ilita	7
2.2.3 Montmorilonita.....	8
2.3 Identificação dos solos expansivos	10
2.4 Fatores que influenciam a expansão do solo	13
2.5 Métodos de previsão do potencial expansivo de solos.....	15
2.5.1 Métodos indiretos.....	15
2.5.2 Métodos diretos	20
2.6 Tipos de estabilização de solos expansivos.....	23
2.6.1 Estabilização Mecânica	23
2.6.2 Estabilização Química.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Local de Estudo	29
3.2 Materiais.....	30
3.2.1 Solo	30
3.2.2 Polímero Industrial.....	33
3.3 Metodologia	34
3.3.1 Adição do polímero industrial à amostra de solo	35
3.3.2 Ensaio de Caracterização	36
3.3.3 Ensaio de Compactação	39
3.3.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.....	40
3.3.5 Resistência à Compressão Simples	43
3.3.6 Expansão Livre e Pressão de Expansão	44
3.3.7 Difração de raios-X	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Caracterização geotécnica do solo natural	47

4.2 Caracterização geotécnica das misturas	52
4.2.1 Análise granulométrica	52
4.2.2 Massa específica real.....	53
4.2.3 Limites de Atterberg.....	53
4.3 Compactação	54
4.4 Índice de Suporte Califórnia - ISC	55
4.5 Resistência à Compressão Simples - RCS	57
4.6 Expansão Livre.....	58
4.7 Pressão de Expansão	58
5 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICES.....	67
APÊNDICE A – Gráficos de Limite de Liquidez	68
APÊNDICE B – Curvas de Compactação.....	71
APÊNDICE C – Curvas de Resistência à Compressão Simples.....	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os solos são considerados pela engenharia como materiais de construção e de sustentação das obras (AZEVEDO *et al.*, 1998), assim, antes da execução de qualquer obra, seja fundação e/ou pavimentação é de extrema importância a investigação e reconhecimento do local para que atenda o que é esperado do projeto.

Quando o solo possui propriedades peculiares, e se estas não forem bem investigadas, pode causar prejuízos estéticos e estruturais no período de pós-ocupação. Os solos expansivos possuem essas propriedades e são caracterizados pela expansiva variação volumétrica quando há a modificação do seu teor de umidade. Estes solos, em contato com a água, têm grande expansão e quando a perde, sofrem elevada retração. Isto é consequência da grande presença de argilominerais expansivos, como as montmorilonitas (CAVALCANTE *et al.*, 2006).

Os solos expansivos provocam sérios problemas de engenharia geotécnica relacionados à variação de volume e perda de resistência devido à mudança no teor de umidade ocasionada por fatores internos e externos, tais como: umidade natural, densidade, estado de tensões e clima.

Há solos expansivos principalmente em regiões semiáridas, estudos feitos por Cavalcante *et al.*, (2006) registram sua presença próximas ao litoral e no recôncavo baiano. Em Sergipe há bastante ocorrência desse solo nas zonas de expansão da capital Aracaju, e tem sido uma dificuldade a ser vencida.

Várias são as soluções para estes solos, como por exemplo: isolamento das trocas hídricas, substituição do solo e estabilização com cal, ou produtos que reduzam as variações volumétricas e consequentemente os momentos das estruturas subjacentes.

Esta pesquisa visa conhecer e analisar o comportamento dos solos expansivos diante a estabilização química com polímero industrial, com a perspectiva de permitir uso do material local, melhorando suas propriedades e características.

1.2 Justificativa

Os solos expansivos são um problema mundial, causando danos extensivos às estruturas de engenharia civil, Jones e Holtz (1973) *apud* Hart (1974), afirmam que os solos expansivos são um problema em todo os Estados Unidos: a cada ano a retração ou expansão dos solos é responsável por prejuízos de nada menos que 2,3 bilhões de dólares, referente a danos em casas, prédios, estradas e tubulações. Os autores registram comparativamente que 14% do território são atingidos por tornados, terremotos e enchentes, em contrapartida, 20% são afetados por variação de volume causada por solos expansivos. Ainda, mais de 250.000 novas casas são construídas sobre solos expansivos a cada ano, 60% sofrerão pequenos danos, mas 10% sofrerão sérios danos, que vão além de alguns reparos. Finalmente, uma em cada dez pessoas é afetada por enchentes, entretanto uma em cinco por solos expansivos.

Com relação à ocorrência de solos expansivos no mundo Ferreira (1995) lista, além dos Estados Unidos, Espanha, Reino Unido, Angola, Etiópia, Gana, Kênia, Nigéria, África do Sul, Tanzânia, Zíbia, Canadá, Argentina, Peru, Venezuela, Austrália, China, Índia, Romênia, Israel, Jordânia e Arábia Saudita.

No Brasil, não há estimativas quanto ao custo dos danos causados por estes solos, muito embora esses danos tenham sido detectados em vários estados, tais como Bahia, oeste do Mato Grosso do Sul, Paraná e Rio Grande do Sul (OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006). Em Sergipe, estudos de Cavalcante *et al.*, (2006) mostram a presença de solos expansivos nos municípios de Poço Verde e Santo Amaro, onde as construções leves sofreram inclinações e levantamentos nos períodos de chuva, provocando aparecimento de trincas em pisos, paredes e lajes de tetos.

Devido a presença de solo expansivo no Estado e a necessidade de se utilizar os materiais locais e mais próximos das obras, faz-se um estudo aprofundado das opções de tratamento, mais especificamente a estabilização por meio de polímero industrial TerraDry.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento expansivo de misturas de um solo argiloso da formação Piaçabuçu, oriundo do município de Nossa Senhora do Socorro, Estado de Sergipe, e polímero industrial por meio de ensaios realizados em laboratório, empregando-se um polímero industrial.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades geotécnicas do solo utilizado na pesquisa, através de ensaios físicos e mecânicos;
- Analisar a combinação do solo com um polímero industrial, visando-se melhorar as propriedades geotécnicas do solo expansivo;
- Comparar resultados obtidos das misturas solo-polímero, em diferentes teores, com os parâmetros geotécnicos obtidos do solo puro;
- Indicar, se possível, a porcentagem de polímero a ser adicionada ao solo que produziu os melhores resultados, ou seja, a que resultaria na menor expansão, por exemplo;
- Contribuir com os estudos sobre o comportamento dos solos expansivos de Sergipe.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os aspectos dos solos expansivos, constituição e estrutura, como acontece e o que influencia o mecanismo de expansão do solo, métodos de previsão do potencial expansivo e métodos de estabilização de solos expansivos. Busca-se dar maior destaque ao método de estabilização química por meio de polímero industrial estabilizante, com o intuito de utilizar o material no local de execução da obra.

2.1 Solos Expansivos

Os solos expansivos são um problema mundial, causando danos extensivos às estruturas de engenharia civil. Jones e Holtz estimaram em 1973 que o custo anual do dano nos Estados Unidos devido ao movimento expansivo do solo foi de US \$ 2,3 bilhões. Um valor mais atualizado é de cerca de US \$ 9 bilhões em danos anualmente para edifícios, estradas, aeroportos, oleodutos e outras instalações (JONES, 1987).

No Brasil, os solos expansivos já foram identificados nas regiões Sul, Centro Sul, Norte e Nordeste (SOBRAL, 1956; SIMMES *et al.*, 1981; COSTA *et al.*, 1982; VARGAS, 1985; FERREIRA, 2008). Em Pernambuco, há registros nos municípios de: Afrânio, Petrolina, Cedro, Cabrobó, Salgueiro, Floresta, Serra Talhada, Petrolândia, Inajá, Ibirimir, Carnaíba, Nova Cruz, Paulista, Olinda, Recife e Cabo de Santo Agostinho. O Sistema de Informações Geográficas dos Solos Expansivos e Colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE) indicou uma suscetibilidade de ocorrência alta em 12,5% da área do Estado, média em 38,7% e baixa em 45,2% (FERREIRA *et al.*, 2008).

Ayala *et al.*, (1986) utilizam o termo expansividade para definir a propriedade do solo experimentar variações de volume ao modificar suas condições de umidade, ou para gerar pressões se esta variação for impedida. Apesar de determinados solos ou rochas poderem apresentar inchamento por descompressão ou modificações mineralógicas ou texturais, ao atingir cotas superficiais, o fenômeno de expansão é associado convencionalmente à capacidade intrínseca de alguns minerais argílicos no solo, em especial montmoriloníticos, de modificar sua estrutura laminar por adsorção de moléculas polares. Essa capacidade intrínseca do mineral argílico é atribuída a peculiaridades como: mineralogia, tamanho e organização textural. O fenômeno é deflagrado pela variação do teor de umidade no solo sendo, portanto, necessário o estudo das condições do meio

ambiente, vinculadas não só basicamente ao clima, mas também relacionadas à posição do nível freático, vegetação, profundidade, estrutura do solo e posição estratificada. A ação antrópica é resumida às modificações impostas na admissão e eliminação da água no solo. Evidentemente, devido ao caráter reversivo do processo, tanto o solo pode apresentar expansão pelo umedecimento como contração devido à dessecação.

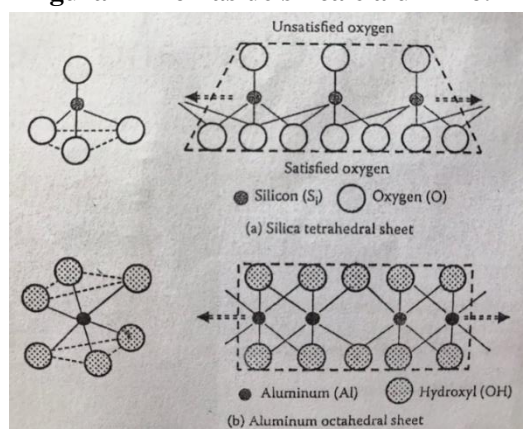
2.2 Principais argilominerais formadores dos solos expansivos

“Os argilominerais são basicamente silicatos hidratados de Al e/ou Fe e Mg, podendo conter ainda, como componentes essenciais um certo teor de elementos alcalinos ou alcalinos-terrosos” (SANTOS, 1989).

Para entender os vários comportamentos da argila na engenharia é importante o estudo e conhecimento de sua microestrutura, visto que a observação micro estrutural ajuda a compreender seu macro comportamento (LAMBE, 1969).

Na natureza, basicamente existem três tipos de argila, nomeadamente, argila caulinita, illita e montmorilonita. Essas argilas têm estruturas atômicas e comportamentos diferentes. É importante ressaltar também que esses minerais de argila são todos feitos de duas camadas atômicas básicas, camada sílica tetraédrica e camada de octaedro de alumínio, como se vê na Figura 1. Átomo naturalmente abundante, a sílica (Si), e o átomo de alumínio (Al), ocupam as posições centrais das camadas, e o átomo de oxigênio (O) e a hidroxila (OH⁻) estão fortemente ligados aos átomos do núcleo, respectivamente dos citados acima. Essas uniões são ligações iônicas ou ligações covalentes, e as ligações efetivas na camada de sílica e na camada de alumínio são combinações desses dois tipos de ligações (LAMBE, 1969).

Figura 1 - Folhas de sílica e alumínio.



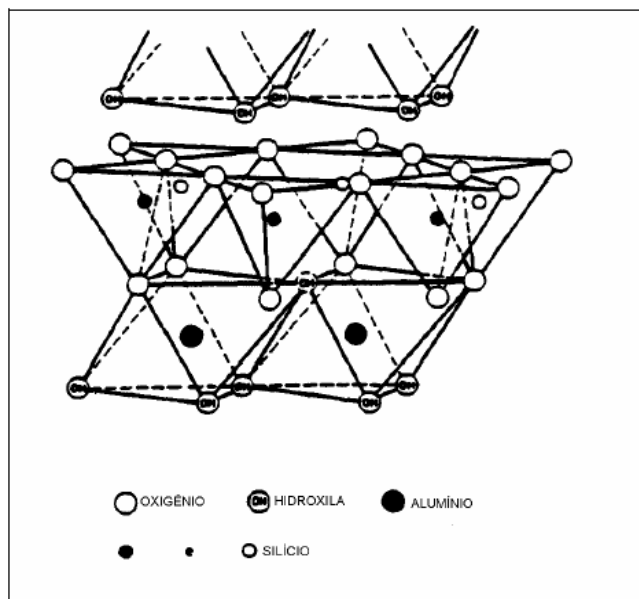
Fonte: Lambe (1969).

Da Figura 1 se pode notar que as ligações iônicas ocorrem por causa da troca de elétrons em órbita de dois átomos, como o Na^+ (íon de sódio) e Cl^- (íon de cloro) para fazer NaCl (sal = cloreto de sódio) e a ligação covalente é devida ao compartilhamento de elétrons em suas órbitas, como dois H^+ (íons de hidrogênio) para formar H_2 (gás hidrogênio). Essas ligações atômicas são muito fortes e nunca serão quebradas pelas forças físicas comuns e são as chamadas ligações primárias. A camada tetraédrica de sílica é simbolizada com um trapezóide, dos quais a face menor mantém átomos de oxigênio eletricamente instáveis e a face maior mantém átomos de oxigênio eletricamente estáveis. A camada de octaedro de alumínio é simbolizada com um retângulo com faces superiores e inferiores tendo as mesmas características da hidroxila exposta (OH^-). Na maioria dos casos na natureza, as camadas estão ainda mais ligadas, basicamente devido à face instável da camada de sílica, o que forma os vários argilominerais (LAMBE, 1969).

2.2.1 Caulinita

O argilomineral caulinita apresenta camadas do tipo 1:1, que resultam da combinação de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica, que se superpõem indefinidamente, como mostra a Figura 2. As camadas estruturais ligam-se entre si, por pontes de hidrogênio entre átomos O^{2-} e por grupos OH^- de planos atômicos justapostos (GOMES, 1986 *apud* PEREIRA 2004). A fórmula estrutural é representada por $(\text{OH})_8\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}$ (CARVALHO, 1997).

Figura 2 - Esquema estrutural de base de uma caulinita.



Fonte: Grim, 1962 *apud* Pereira (2004).

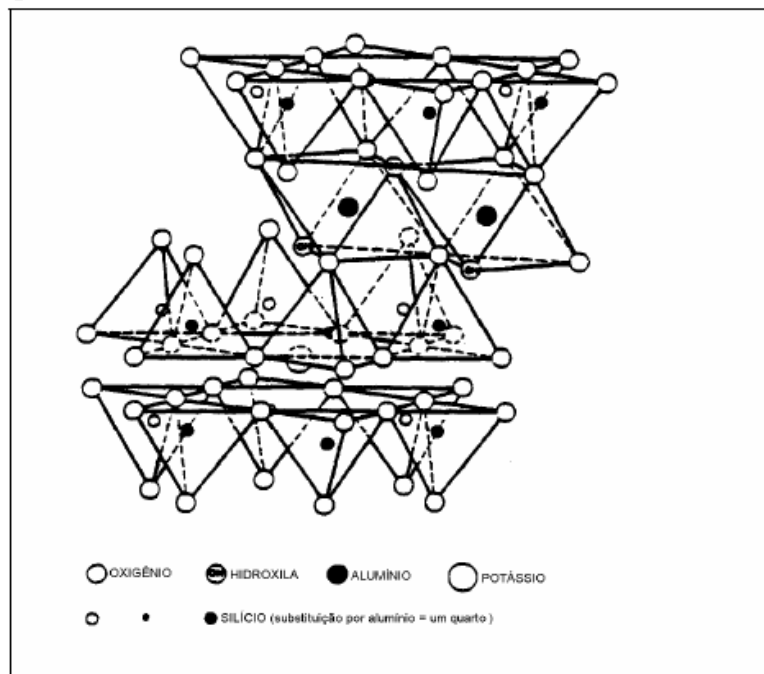
Segundo Grim (1962) *apud* Pereira (2004) os minerais deste grupo são pouco expansivos, porque não ocorre hidratação das camadas estruturais, devido à distância reticular ser muito pequena e a pouca adsorção superficial. A adsorção superficial é incipiente, devido à estrutura ser quase eletricamente neutra, por não ocorrer ou ocorrer muito pouca substituição isomórfica. Podem existir pequenas substituições de Al por Fe e/ou Ti nas variedades relativamente menos cristalinas. Os argilominerais do grupo da caulinita apresentam baixa capacidade de troca catiônica, da ordem de 1 a 10 meq/100g.

A caulinita é o argilomineral mais comum em solos residuais maduros, por ser estável, não caracteriza o solo como problemático, principalmente quanto à característica de plasticidade e expansão (solo medianamente plástico e com comportamento não expansivo) (CARVALHO, 1997).

2.2.2 Ilita

As ilitas pertencem ao grupo das micas e são constituídas por uma folha octaédrica intercalada a duas folhas tetraédricas, sendo as camadas estruturais ligadas por cátions monovalentes, normalmente K^+ . Apresenta uma estrutura semelhante à das micas (Figura 3), com um espaçamento basal de 1,0 nm (GRIM, 1962 *apud* PEREIRA, 2004).

Figura 3 - Esquema estrutural da muscovita. A estrutura da ilita é semelhante.



Fonte: Grim, 1962 *apud* Pereira (2004).

Segundo Gomes (1986) *apud* Pereira (2004), a ilita possui maior carga elétrica negativa por unidade de superfície do que a montmorilonita, e a carga negativa da ilita

está localizada na folha tetraédrica, ou seja, mais próxima dos cátions intercalares. Ao contrário, na montmorilonita a carga está mais concentrada na folha octaédrica. Assim, as forças estruturais intercamadas na illita são mais fortes, e a água e outros líquidos polares dificilmente podem penetrar entre aquelas camadas.

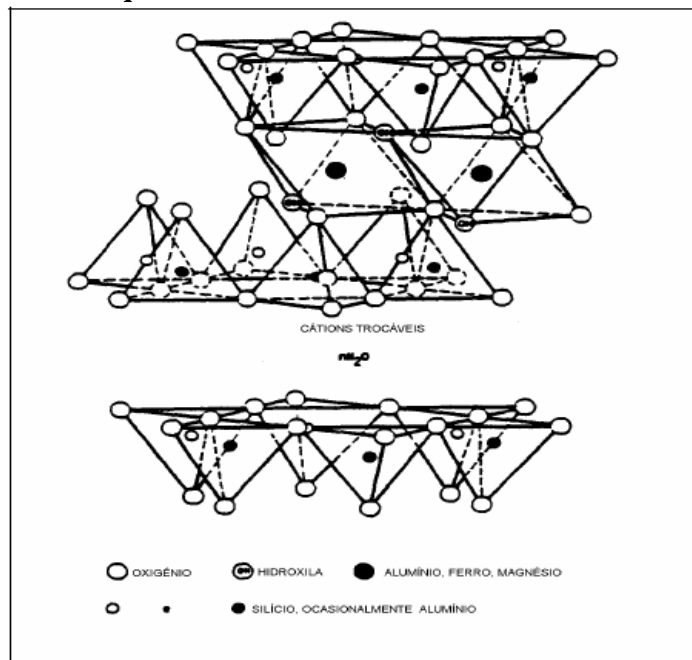
De acordo com Olphen (1963) *apud* Pereira (2004), a principal diferença da illita para a montmorilonita, é que a primeira não apresenta expansividade intercrystalina, devido à forte ligação iônica gerada pelos íons K^+ entre as camadas estruturais.

A illita somente manifesta sensibilidade a água em condições de extrema degradação, e esta ocorre devido à perda de íons K^+ das arestas expostas da partícula, tornando-a muito plástica. A capacidade de troca de cátions do grupo é da ordem de 10 – 40 meq/100g (MITCHELL, 1976 *apud* PEREIRA, 2004).

2.2.3 Montmorilonita

Os argilominerais do grupo montmorilonita ou esmectita são formados empilhamentos ao acaso de duas folhas tetraédricas de silicato com uma folha octaédrica de alumínio no meio, ligadas entre si pelo oxigênio comum às folhas, conforme a Figura 4 (CARVALHO, 1997).

Figura 4 - Esquema estrutural de base de uma montmorilonita.



Fonte: Grim, 1962 *apud* Pereira (2004).

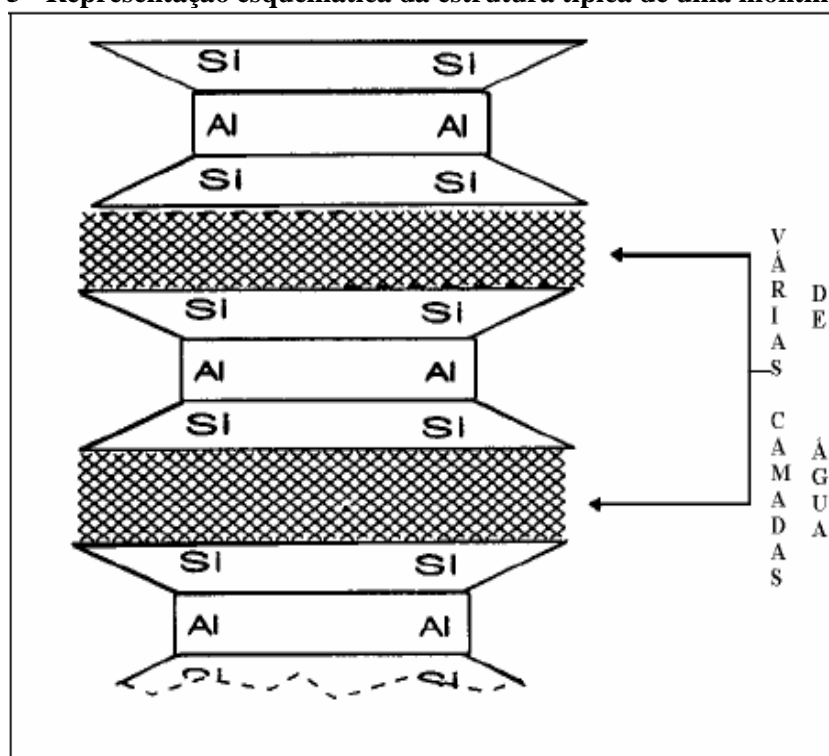
De acordo com Olphen (1963) *apud* Pereira (2004), a expansividade intracrystalina das montmorilonitas pode ser explicada pela:

- Hidratação dos cátions existentes entre as camadas estruturais pelas moléculas polares de água, diminuindo a força atrativa das camadas;
- Adsorção de moléculas de água na superfície das camadas formadas por oxigênio, estabelecendo ligações de hidrogênio.

As maiores variações volumétricas nas montmorilonitas devem-se a expansibilidade osmótica que em condições particulares de confinamento, podem levar a pressões de expansão elevadas (PEREIRA, 2004).

Através da Figura 5, pode-se observar um esquema de absorção de água entre as camadas estruturais de montmorilonita.

Figura 5 - Representação esquemática da estrutura típica de uma montmorilonita.



Fonte: Yong *et al.*, 1992, *apud* Pereira (2004).

Nas montmorilonitas, quando o Ca e o Mg são os cátions trocáveis predominantes, a expansão é menor, pois esta aumenta com a diminuição da valência do cátion (PEREIRA, 2004).

As partículas da montmorilonita são muito pequenas e finas, tendo uma grande área específica (podendo atingir 800 m²/g), possuindo, portanto, uma elevada plasticidade e um comportamento coloidal (CARVALHO, 1997). A capacidade de troca de cátions do grupo é da ordem de 80 – 150 meq/100g (MITCHELL, 1976 *apud* PEREIRA, 2004).

2.3 Identificação dos solos expansivos

O engenheiro geotécnico pode, muitas vezes, identificar visualmente o solo expansivo seco devido às numerosas quebras da superfície do solo, como é mostrado na Figura 6.

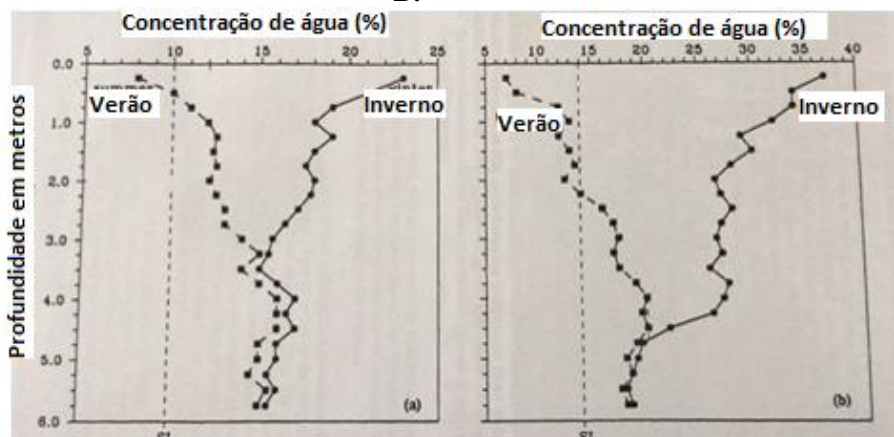
Figura 6 - Aspectos de um solo expansivo em período de estiagem.



Fonte: www.abms.com.br

Os depósitos de solos expansivos secos também têm geralmente um perfil de conteúdo de água distinto, onde o teor de água aumenta com a profundidade. Por exemplo, a Figura 7 mostra o teor de água versus a profundidade para dois depósitos de argila localizados em Irbid, Jordão (AL-HOMOUD *et al.*, 1997). O depósito de solo A tem um limite de liquidez de 35% e um índice de plasticidade de 22%, enquanto o depósito de solo B tem um limite de liquidez de 79% e um índice de plasticidade de 27% (AL-HOMOUD *et al.*, 1995).

Figura 7 - Representação do teor de água versus a profundidade para: (a) Solo A; (b) Solo B.



Fonte: Day (1999).

De acordo com a Figura 7 (DAY, 1999), observa-se que durante o verão, o teor de umidade do solo é significativamente menor do que durante o inverno. Além disso, nessa época do ano, a menor percentagem de água é registrada próxima da superfície do terreno, de forma que esse teor de umidade é inferior ao limite de contração do solo.

Ferreira (1999) afirma que a identificação de solos expansivos é um estágio essencial no sucesso de projetos de engenharia, devido aos consequentes danos ao negligenciá-los. Falhas neste estágio podem não se restringir a apenas pequenos remendos em fissuras. O reconhecimento visual destes solos em campo não é suficiente e os índices tradicionalmente utilizados na caracterização dos solos, como SPT, granulometria, consistência etc, não são capazes de identificar com exatidão a natureza e o grau de expansão ou colapso que o solo apresentará.

A tarefa de identificação e classificação de solo expansivo pode ser dividida em duas partes: a primeira consiste na obtenção de informações prévias mediante fissuras nas edificações e informações junto aos moradores da região, a segunda na interpretação de ensaios de laboratório e no uso de métodos de identificação (PAIVA, 2009).

Em campo, Ayala *et al.*, (1986) apontam algumas características dos solos expansivos da Espanha que podem servir de auxílio na sua identificação, sendo listada as características comuns a estes solos no Brasil:

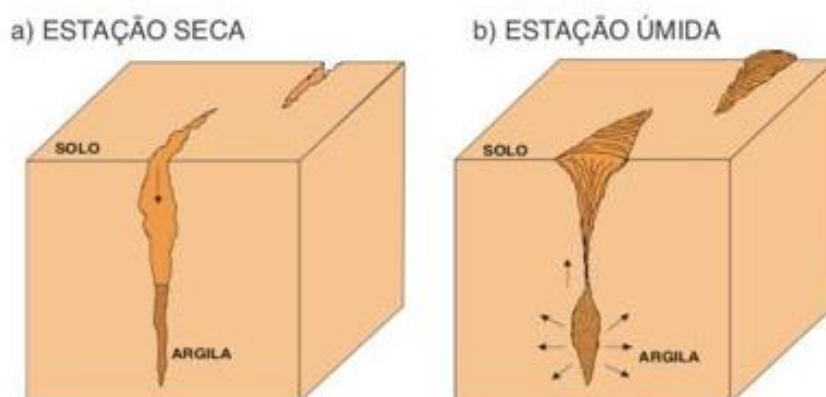
- ausência, em geral de árvores e arbustos caducifólios (Figura 8 - a);
- cores primárias do solo (cinzentas, esverdeadas ou azuladas);
- fendas poligonais amplas, profundas e por vezes de bordas irregulares, na superfície do terreno, durante a estação seca (Figura 8 – b);
- fácil moldagem do solo quando umedecido, manchando os dedos;
- lama pegajosa que adere fortemente ao calçado e à maquinaria;
- quando seco o solo é resistente, sendo difícil rompê-lo com instrumentos manuais;
- podem apresentar um micro relevo característico devido aos movimentos verticais de solo ocasionados pelos ciclos de umedecimento e secagem das argilas (Figura 9).

Figura 8 - a) Aspecto geral da vegetação no início do período chuvoso e b) macroestrutura do solo na estação seca, solos.



Fonte: Ferreira (1997).

Figura 9 - a) Estação seca: fendas com queda da argila. b) Estação úmida: fechamento das fendas e descolamento da argila.



Fonte: Ayala *et al.*, (1986).

Nas edificações, a expansão e a retração podem provocar fissuras e rachaduras devido aos esforços diferenciais impostos à estrutura, como mostrado na Figura 10. O fenômeno provoca também ondulações e rupturas nos pavimentos, fissuras longitudinais e transversais junto a bueiros.

Figura 10 - Danos nas edificações causados por solos expansivos.

Fonte: Ferreira (1997); Cavalcante *et al.*, (2007).

2.4 Fatores que influenciam a expansão do solo

Vários são os fatores que influenciam o mecanismo de expansão e contração dos solos expansivos, os quais podem ser resumidos em três grandes grupos: propriedades do solo, condicionantes ambientais e estados de tensão (NELSON; MILLER, 1992).

As características e propriedades do solo são classificados como fatores intrínsecos, referindo-se a natureza e arranjo de suas partículas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores que influenciam na expansão dos solos.

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Mineralogia da argila	Os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são: montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinita não são frequentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando o tamanho das partículas são extremamente pequenos.	Grim (1968); Mitchell (1973, 1976); Snethen <i>et al.</i> , (1977).
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion.	Mitchell (1976).
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água.	Snethen (1980); Fredlund; Morgenstern (1977); Johnson (1973); Langfelder (1965); Aitchison <i>et al.</i> , (1965).
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração. Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	Nelson <i>et al.</i> , (1992).
Estrutura e Textura do solo	Argilas flocladas tendem ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem.	Johnson <i>et al.</i> , (1978); Seed <i>et al.</i> , (1962).
Densidade Seca	Elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e elevado potencial de expansão.	Chen (1973); Komornik e David (1969); Uppal (1965).

Fonte: Nelson; Miller (1992).

Os fatores extrínsecos estão relacionados com as condições do meio ambiente e estados de tensão que podem afetar o potencial de expansão do solo, como mostram as tabelas a seguir.

Tabela 2 - Fatores relacionados as condições do meio ambiente.

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido quando exposto à secagem e contrairá mais do que um perfil de solo inicialmente seco.	
Variações de umidade	Variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume.	Johnson (1969).
Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semiáridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland; Lawrence, (1980).
Água do subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de água superficiais contribuem para o aumento da umidade.	
Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc., próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Krazynski (1980); Donaldson (1965).
Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tornam diferentemente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Bucley (1974).
Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade, particularmente devido a fissuras e rachaduras na massa de solo, permitem uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise; Hudson, (1971); Debruijn (1965).
Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson; Strong, (1976); Hamilton (1969).

Fonte: Nelson; Miller (1992).

Tabela 3 - Fatores relacionados a estados de tensão.

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Condições de Tensão		
Histórico de tensões	Um solo sobreadensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento do mesmo tipo de solo. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem a reduzir a expansão em amostras de laboratório, mas após um certo número de ciclos, a expansão não é afetada.	Mitchell (1976); Kassif; Baker, (1971).
Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis consequências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	
Carregamento	A grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa aplicada atua para balanceamento das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz (1959).
Perfil do solo	A espessura e posição da camada potencialmente expansiva influencia consideravelmente no movimento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrerão se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland; Lawrence, (1980).

Fonte: Nelson; Miller (1992).

2.5 Métodos de previsão do potencial expansivo de solos

Atualmente, há diversos métodos, diretos ou indiretos, para identificação do potencial expansivo das argilas. A identificação e classificação de solos expansivos é realizada com a finalidade principal de caracterizar de forma qualitativa o seu potencial expansivo. Essa classificação pode auxiliar os engenheiros durante as etapas preliminares do projeto, sobre os problemas potenciais destes materiais e proporcionar um apoio quanto à forma de tratamento e da necessidade de ensaios adicionais, usando técnicas quantitativas de determinação da expansão (PEREIRA, 2004).

Os métodos destinados a medir as variações volumétricas dos solos são variados, e entre eles destacam-se: a expansão livre, mudanças do potencial de volume e os testes edométricos. Alguns critérios são disponíveis para a classificação dos solos expansivos determinados a partir dos testes de identificação e geralmente são baseados nas propriedades índices dos materiais (PEREIRA, 2004).

A *Unified Soil Classification System* (USCS) e a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) são alguns dos métodos de classificação que admitem os solos expansivos denominados dentro da sua terminologia como CL e CH para USCS e A6 e A7 para AASHTO, respectivamente (PEREIRA, 2004).

2.5.1 Métodos indiretos

São aqueles que recorrem à identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento dos solos (BARBOSA, 2013).

Para uma identificação mais precisa e confiável deve-se recorrer a ensaios laboratoriais, sendo que para a determinação da constituição mineralógica dos materiais argilosos, geralmente os métodos mais usados são: Difração de Raios-X, Análise Térmica Diferencial (ATD), Análise Termogravimétrica (ATG), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Microscopia Eletrônica, entre outros (PEREIRA, 2004).

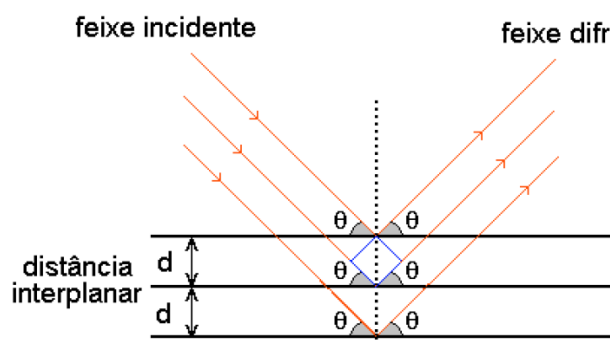
A identificação de argilominerais presentes num material argiloso pode ser facilmente realizada quando a amostra é pura, ou seja, quando possui apenas um tipo de argilomineral. As dificuldades para a identificação ocorrem quando existem misturas de argilominerais de vários grupos, seja pela possibilidade de interferência nos diversos métodos de identificação, seja pelo fato de alguns argilominerais não serem detectáveis abaixo de determinado teor na amostra. Quando a amostra é pura, um único método pode ser suficiente para identificar argilomineral presente, caso contrário, deve-se empregar

vários métodos, que irão fornecer um conjunto de dados que possibilitarão que a determinação da composição mineralógica seja mais precisa (PERERIRA, 2004).

2.5.1.1 Difração de Raios-X

A primeira relação da DRX para estruturas cristalinas foi formulada por W. L. Bragg, e é conhecida como Lei de Bragg (CULLITY, 1972). Para descrever a relação, Bragg deduziu que o feixe incidente normal ao plano de difração produz um feixe difratado que é sempre co-planar e que o ângulo entre o feixe difratado e o transmitido é sempre duas vezes o ângulo incidente normal a superfície (2θ). A Figura 11 mostra melhor a dedução de Bragg.

Figura 11 - A difração de raios-X do ponto de vista de Bragg.



Fonte: Cullity (1972).

Através dessa relação (eq 1) é possível extrair as informações das propriedades estruturais dos materiais, ou seja, o tipo de estrutura cristalina, os parâmetros de rede da célula unitária e os tamanhos dos cristalitos. Além disso, existe a possibilidade de obter dados do fator de ocupação de cada átomo em seu sítio cristalino. A informação que se observa num padrão de DRX vem da interação das ondas eletromagnéticas com os átomos do cristal. Quando os raios-X passam através do cristal, cada átomo na estrutura espalha as ondas de maneira aleatória em todo o espaço. Apenas para algumas direções, os feixes combinam-se, fazendo que aumente a intensidade (interferência construtiva). Essas direções de maior intensidade estão relacionadas com a distância entre planos atômicos, d_{hkl} , e com o ângulo número inteiro.

$$n\lambda = 2d.\sin\theta \quad (\text{eq 1})$$

onde n é um número natural, λ é o comprimento de onda da radiação incidente, d é a distância interplanar e θ é o ângulo de incidência em relação ao plano considerado.

Deste modo, um padrão de DRX é um gráfico das intensidades difratadas observadas como função do ângulo de Bragg.

2.5.1.2 *Análise Térmica Diferencial*

De acordo com Santos (1989) *apud* Pereira (2004), o método consiste no aquecimento, em velocidade constante, de uma argila, junto com uma substância termicamente inerte (geralmente óxido de alumínio-alfa ou coríndon), registrando as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a argila em estudo, em função da temperatura de aquecimento. Quando ocorrem transformações endotérmicas ou exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial ou termograma. Os recipientes ou blocos, em que são colocadas a substância e a argila, podem ser de níquel (para temperaturas de até 1100°C) ou de óxido de alumínio ou platina para temperaturas até 1600°C.

2.5.1.3 *Análise Termogravimétrica*

Segundo Santos (1989) *apud* Pereira (2004), a análise termogravimétrica consiste no aquecimento da argila à velocidade constante, sendo que o aparelho se encontra conectado a uma balança, permitindo o registro das variações de massa em função da temperatura.

2.5.1.4 *Adsorção de Azul de Metileno*

De acordo com Merck e Co (1952), o corante denominado “azul de metileno”, ($C_{16}H_{18}N_3S^+$) tem em química a nomenclatura “cloridrato de metiltiamina” ou “cloreto de 3,7-Bis (dimetilamino) fenilatium”, trata-se de um corante catiônico, ou seja, que em solução aquosa dissocia-se em ânions cloreto e cátions “azul metileno”.

Esse corante orgânico é adsorvido pelo solo, quando em meio aquoso, formando uma camada monomolecular quase que completa sobre a superfície dos argilominerais, permitindo, dessa forma, uma vez conhecida as dimensões de sua molécula conhece-se a área total recoberta (HANH e BRINDLEY, 1970), ou seja, possibilita a determinação da superfície específica (área interna + área externa) dos argilominerías que compõem um solo.

O método de adsorção de azul de metileno também permite a determinação da capacidade de troca de cátions (CTC) dos argilominerais. Segundo Chen *et al.*, (1974), o cátion azul de metileno substitui os cátions Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} e H_3O^+ adsorvidos nos argilominerais, ocorrendo um processo de adsorção irreversível, caracterizando-se como uma boa forma de medida da capacidade de troca catiônica. O autor relata também sobre

a existência de duas fases no mecanismo de interação do azul de metileno com o argilomineral: troca catiônica e adsorção.

- a) “Troca de cátions: A molécula de azul de metileno dissocia-se na água e forma o cátion azul de metileno que pode trocar com cátions das argilas. Esta troca é uma relação preferencial que fixa o cátion de azul de metileno à superfície dos argilominerais; também após os cátions das argilas terem sido trocados pelos cátions de azul de metileno, as superfícies das argilas transformam-se num estado não molhável ou hidrofóbico. A troca de cátions de azul de metileno é considerada uma reação irreversível (WORRAL, 1958 *apud* CHEN *et al.*, 1974).”
- b) “Adsorção: Existem dois tipos de adsorção: física e química. A adsorção física (*physical adsorption*) é baseada na forma de atração de *Van de Waals* e a adsorção química (*chemi-adsorption*) é baseada na ligação de pontes de hidrogênio (*hydrogen bonding*). O nível de energia da adsorção química é maior que o da física. Vários autores estudaram esse fenômeno e apresentaram várias teorias baseadas no equilíbrio entre moléculas livres na solução.”

2.5.1.5 Microscopia eletrônica de Varredura

De acordo com Mitchell (1993) *apud* Pereira (2004), o microscópio eletrônico é um instrumento valioso para o estudo de solos ou rochas, porque com os microscópios eletrônicos modernos, é possível uma resolução para distâncias menores que 0,01 nm, podendo assim, ser realizado o estudo das pequenas partículas de argila.

Segundo Santos (1989) *apud* Pereira (2004), as informações que se podem esperar do estudo de uma argila ao microscópio eletrônico são:

- a) Determinação da morfologia ou hábito cristalino das partículas constituintes;
- b) Identificação dos argilominerais presentes;
- c) Possibilidade de medida das dimensões das partículas para a distribuição da curva de distribuição granulométrica das mesmas;
- d) Detectar a presença de pequenos teores de argilominerais não detectáveis por difração de raios-X;
- e) Presença de materiais ou minerais amorfos, como alofanos;
- f) Disposição e orientação das partículas na rocha, no estado em que se encontram na natureza;
- g) Determinação do sinal e da distribuição das cargas elétricas na superfície da

partícula, como por exemplo, a adsorção de partículas negativas de ouro coloidal, por partículas de caulinita e montmorilonita.

2.5.1.6 Limites de Atterberg

A expansividade pode ser analisada baseando-se nos limites de consistência, a partir dos valores dos limites de liquidez, plasticidade e o índice de expansão. Os valores resultantes destes ensaios permitem uma avaliação quantitativa de potencialidade de expansão (FRAZÃO, 1981 *apud* PEREIRA, 2004).

De acordo com Carvalho (1997), sabe-se que os Limites de Atterberg são uma função da quantidade de água absorvida na superfície das partículas do solo. Esta superfície aumenta muito com a diminuição do tamanho das partículas, por exemplo, a montmorilonita têm uma superfície específica, da ordem de 800 m²/g, muito maior que a caulinita, da ordem de 15 m²/g, assim, a quantidade de água absorvida aumenta de acordo com a quantidade de pequenas partículas, e consequentemente, o comportamento do material, vai estar diretamente relacionado com este aspecto.

2.5.1.7 Atividade

Outra forma de avaliar a expansividade dos materiais argilosos é por meio do índice de atividade de Skempton (1953), que corresponde à razão entre o índice de plasticidade de Atterberg pela % da fração inferior a 2 µm. Quanto maior a atividade, maior é a influência da fração de argila no IP.

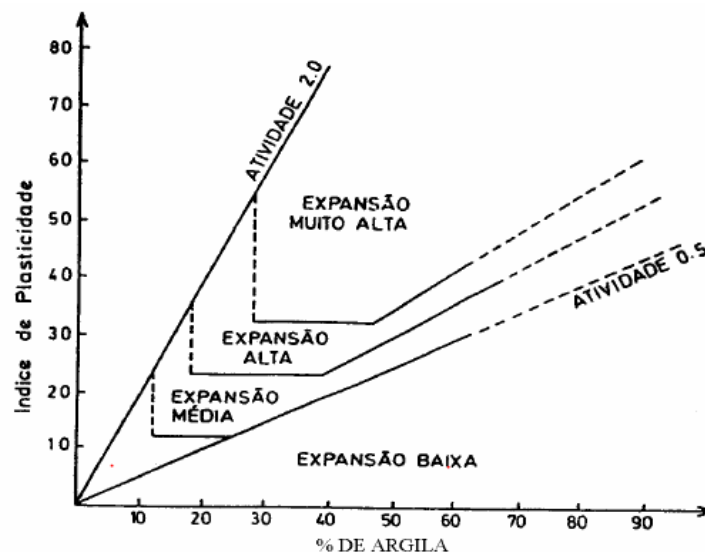
Os valores típicos da atividade para várias argilas são mostrados na Tabela 4, ressaltando que a atividade está altamente relacionada aos potenciais de retenção e contração dos solos (LAMBE, 1956).

Tabela 4 – Atividade para os minerais de argila.

ATIVIDADE PARA OS MINERAIS DE ARGILA	
Mineral	Atividade
Montmorilonita	1-7
Ilita	0,5-1
Caulinita	0,5

Fonte: After Mitchell, J. K. e Soga, K., (2005).

Williams e Donaldson (1980) *apud* Pereira (2004), estabeleceram uma classificação da expansividade de solos com base nos índices de Skempton, como mostra a figura a seguir.

Figura 12 - Classificação da expansividade de argilomineirais e materiais argilosos.

Fonte: Williams e Donaldson (1980) *apud* Pereira (2004).

2.5.2 Métodos diretos

Os métodos diretos são baseados na medida da expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedir esta expansão, realizando-se ensaios mecânicos do tipo edométrico onde procuramos simular, ao máximo, a condição de campo sendo por carregamento, por inundação ou percolante. Inundam-se os corpos de prova, quando as deformações decorrentes de certa pressão já se estabilizaram mede-se a expansão ocorrida (BARBOSA, 2013).

A expansão depende da pressão aplicada à amostra, sendo tanto menor quanto maior a pressão. Existe uma pressão máxima para a qual inibe-se a expansão, pressão esta denominada de pressão de expansão, de forma que para pressões maiores que essa, é comum ocorrer a contração do solo. Para a determinação da pressão de expansão, diversos corpos de prova são ensaiados, cada qual inundado com pressão diferente, medindo-se a expansão correspondente. Obtém-se por interpolação a pressão para qual não há expansão (BARBOSA, 2013).

2.5.2.1 Expansão Livre

Os ensaios de expansão “livre” medem a variação de espessura da amostra fazendo-se uma relação entre a sua altura inicial e final, quando é colocada dentro de um recipiente com água. Para se determinar a expansão livre coloca-se a amostra do solo no edômetro e inundando-se com uma pequena tensão, permitindo a sua expansão livremente. A

expansão “livre” é determinada em percentual após a sua estabilização. As metodologias aplicadas a esse ensaio são com relação à sobrecarga aplicada. Nessas metodologias, as tensões mais utilizadas são 1 kPa, 7 kPa e 10 kPa, aplicadas a solos não compactados, enquanto que para amostras deformadas utiliza-se a tensão de 50 kPa (CHEN, 1965 *apud* BARBOSA, 2013).

A percentagem de expansão “livre” pode ser obtida aplicando-se a seguinte equação:

$$E(\%) = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (\text{eq 2})$$

Onde: E = expansão “livre”, em percentagem; ΔH = altura da expansão devido à saturação; e H = altura do corpo de prova antes da inundação. Os resultados dos ensaios são expressos na forma de gráficos, obtidos através dos valores de deformação *versus* tempo.

2.5.2.2 Pressão de Expansão

Os ensaios edométricos, descritos a seguir, são os mais utilizados para analisar a variação volumétrica dos materiais expansivos.

- Método da amostra a volume constante

Um dos métodos propostos pela Associação Internacional de Mecânica das Rochas para determinação da pressão de expansão é a volume constante. Nesse método, utiliza-se um corpo de prova que é submetido a uma pressão vertical pré-estabelecida, sendo em seguida inundado. A pressão aplicada pode ser apenas o suficiente para ajuste do sistema, ou, corresponder à pressão vertical estimada do material “*in situ*”. O teste mede a pressão axial necessária para forçar uma amostra de solo indeformada a manter uma altura a manter uma altura constante quando confinada e imersa em água (PEREIRA, 2004).

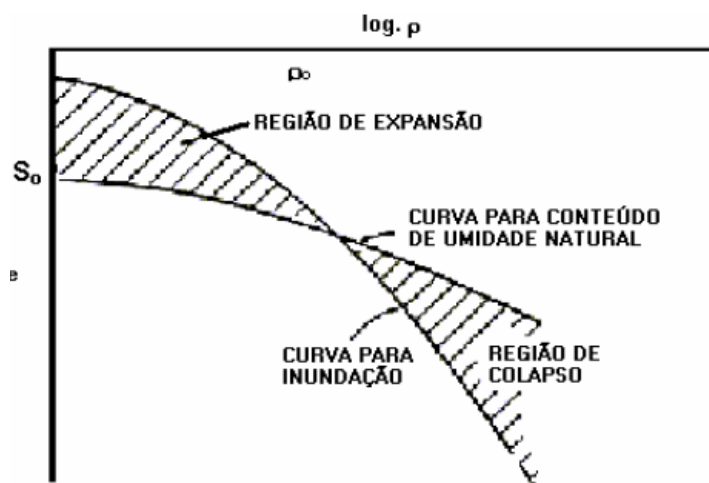
- Ensaio edométrico direto

É o ensaio considerado mais simples para a determinação da expansão, portanto, um dos mais utilizados. É realizado colocando-se uma amostra indeformada na célula edométrica, com teor de umidade natural, saturando-a e em seguida, submetendo-a a uma carga correspondente ao valor de sobrecarga do terreno. Caso o ensaio esteja sendo realizado para algum projeto específico, deve-se adicionar à amostra uma carga adicional, correspondente à solicitação imposta pela estrutura que será construída (PRESA, 1984 *apud* PEREIRA, 2004).

- Ensaaios edométricos múltiplos

No ensaio edométrico múltiplo se utilizam várias amostras com umidade natural, montando-as no edômetro convencional com diferentes sobrecargas. Em seguida, são inundadas e medidas suas expansões depois de estabilizadas. Isto equivale a realizar ao mesmo tempo vários ensaios do tipo acima referido. Geralmente os resultados são apresentados através de duas curvas, conforme a Figura 13, uma que corresponde a variação dos índices de vazios das amostras com conteúdo de umidade natural e a outra a variação dos índices de vazios para as amostras inundadas construída (PRESA, 1984 *apud* PEREIRA, 2004).

Figura 13 - Ensaio endométrico múltiplo.



Fonte: PEREIRA (2004).

- Ensaaios edométricos duplos

De acordo com Pereira (2004), neste ensaio são utilizadas duas amostras indeformadas, retiradas adjacentes, na mesma profundidade, que vão sendo carregadas progressivamente em dois edômetros distintos. Uma das amostras é ensaiada com teor de umidade natural desde o início do ensaio, até o final, e a outra ensaiada com excesso de água. A amostra ensaiada com água, deixa-se expandir com a carga inicial do ensaio, até estabilizar. Em seguida, as duas amostras são sujeitas a aumento de carga, de acordo com o ensaio de consolidação normal.

- Ensaio edométrico simples

Segundo Jennings (1973) *apud* Pereira (2004), no ensaio de edométrico duplo, a amostra ensaiada no teor de umidade natural, se destina, exclusivamente, para a determinação do índice de vazios inicial (e_0), sob tensão vertical, na profundidade de retirada a amostra (p_0). Neste caso, pode-se determinar o valor de $e_0(p_0)$, colocando no edômetro apenas uma amostra com teor de umidade natural até a tensão p_0 , depois descarrega até a pressão inicial. Seria então adicionada água à amostra, que expandiria até a estabilização.

2.6 Tipos de estabilização de solos expansivos

Estabilizar um solo é de um modo geral, utilizar um processo de natureza física, físico-química ou mecânica de maneira a tornar esse solo estável para os limites de sua utilização, fazendo com que esta estabilidade permaneça sob ações de cargas exteriores e ações climáticas variáveis (BAPTISTA, 1976).

Várias técnicas são utilizadas na estabilização de solos, as quais são divididas em dois grupos: estabilização mecânica e estabilização química. O primeiro, procura melhorar as características do solo através de correção da sua composição granulométrica e plasticidade por incorporar ou retirar determinadas quantidades de frações do solo, até a obtenção de parâmetros estabelecidos por norma. O segundo, visa modificar permanentemente as propriedades físicas e mecânicas do solo com a utilização de aditivos como a cal, o cimento Portland, silicatos de sódio, materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, em quantidade que seja suficiente para que se possam influenciar positivamente nas propriedades do solo (GUIMARÃES, 2002).

Alguns tipos de estabilização de solos expansivos são descritos a seguir:

2.6.1 Estabilização Mecânica

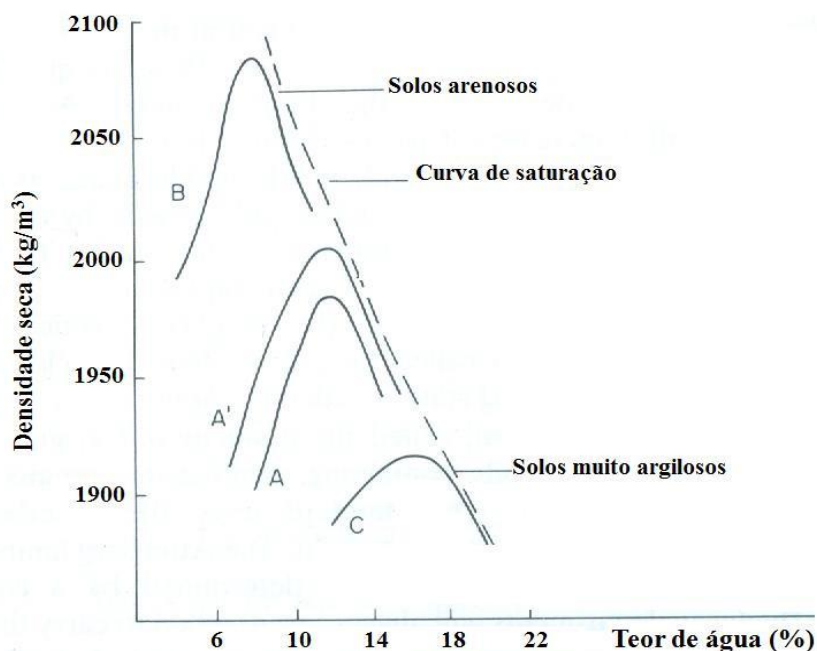
2.6.1.1 Grouting

A injeção de grouting tem sido praticada por muitos anos, mais, no entanto, para tratamentos de rochas do que para solos. Isto é devido às limitações práticas impostas pela viscosidade e tamanho de partícula na penetração de uma argamassa. É difícil armar outros solos que não sejam muito arenosos, com permeabilidades de 10 a 3 cm/s, além disso, o procedimento é caro.

2.6.1.2 Compactação

A finalidade da compactação é elevar a densidade do solo, aumentando ao mesmo tempo a sua resistência. Para que a compactação atinja melhores resultados, solos que possuam grãos de variados tamanhos e com uma pequena quantidade de argila são preferíveis. A Figura 14 demonstra a variação da densidade seca máxima e da umidade ótima com o tipo de solo. Solos muito argilosos (Curva C) têm a tendência de possuir as menores densidades secas e as maiores umidades ótimas. No entanto, solos arenosos (Curva B) possuem maiores densidades secas e menores umidades ótimas. Para um mesmo solo, se a energia de compactação aumenta, a curva move-se de A para A', ou seja, a densidade seca aumenta, mantendo-se o valor da umidade ótima (CARVALHO, 2011).

Figura 14 - Densidade seca x teor de água.



Fonte: Spense e Cook (1983).

2.6.1.3 Correção granulométrica

A correção granulométrica é feita quando se deseja, por algum motivo específico, alterar a distribuição das partículas do solo. Segundo Barbosa (2002), o teor de cada fração é relevante. Os vazios dos grãos maiores são preenchidos pelos grãos menores, e os vazios desses, pelos miúdos (SENÇO, 2001).

2.6.1.4 Membranas e espumas

O objetivo da aplicação de membranas e espumas é impedir completamente a ação da água no solo, mantendo-se o solo na condição “seca” e obtendo-se a estabilização por meio da impermeabilização do solo. Os principais problemas desse método são a durabilidade e a resistência da membrana e espumas, pois ambas toleram baixos níveis de solicitação.

As principais vantagens das membranas estão voltadas à simplicidade de instalação, além de assolar grandes volumes de solo por um custo de material muito pequeno. Contudo, é necessário o conhecimento dos seus fatores de segurança em operação, e, em particular não é recomendado para usos como proteção de estabilidade de inclinação (onde o concreto pulverizado tem sido frequentemente tentado como uma membrana anti-infiltração), pois as pressões dos poros tendem a se acumular atrás da membrana, finalmente rompendo-o (METCALF, 1958).

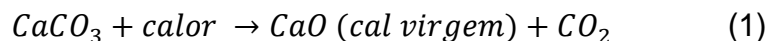
2.6.2 Estabilização Química

2.6.2.1 Estabilização com cal

A estabilização ou melhoria de solos instáveis através da adição da cal é uma das técnicas mais antiga utilizadas pelo homem (GUIMARÃES, 2002).

A cal utilizada na estabilização ou melhoria dos solos é o produto da calcinação, em temperatura aproximadamente de 1000°C, de rochas carbonatadas constituídas predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio, resultando, respectivamente, em Óxidos de Cálcio (CaO) e Cálcio Magnésio (CaO – MgO), denominadas genericamente de cal virgem, cal aérea ou cal viva (GUIMARÃES, 2002).

As reações da formação da cal virgem e da cal hidratada serão representadas pelas equações 1 e 2, respectivamente (LOVATO, 2004).



A adição de cal a um solo e na presença de água desencadeia uma série de reações. Quando se adiciona cal a um solo fino acontecem reações em duas etapas, uma de forma imediata, ou seja, após alguns minutos de contato, devido ao mecanismo de troca catiônica, floculação, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. E a segunda de forma lenta, meses ou anos, caracterizada pelas reações de

cimentação pozolânicas e a carbonatação. A existência e intensidade destas reações estão relacionadas com o tipo de solo, com o tipo e teor de cal, temperatura e tempo de cura (THOMÉ, 1994).

Algumas das principais propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos (ATTOH-OKINE, 1995 *apud* LOVATO, 2004).

A troca de íons é uma reação rápida e consiste na troca de base com os cátions fortes da cal substituindo os íons metálicos fracos, como sódio, magnésio e hidrogênio na superfície da partícula de argila. Esta reação diminui a plasticidade do solo. A floculação e a aglutinação ocorrem na fração de argila, com aparente mudança de textura, aglutinando as partículas de argila de maior diâmetro. A carbonatação envolve e a absorção de dióxido de carbono (CO_2) do ar que reage com o hidróxido de cálcio ou magnésio da cal, formando um agente cimentante fraco, ou seja, uma reação indesejável, tendo em vista que esta pode deter a reação pozolânica, a qual é lenta e ocorre entre a sílica ou alumínio do solo e a cal, produzindo um gel de silicato de cálcio aluminatos cimentante das partículas de solo (BAPTISTA, 1978).

2.6.2.2 Estabilização com cimento Portland

A função do cimento é similar ao da cal. No que se refere a solos estabilizados com cimento é feita uma distinção segundo o DNIT (2006):

- solo-cimento: é uma mistura devidamente compacta de solo, cimento Portland e água que se deve satisfazer a certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6 a 10%;
- solo melhorado com cimento: é obtido com adição de pequenos teores de cimento, cerca de 2 a 4%, visando primordialmente à modificação de solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água.

O solo é o componente de maior quantidade e o mais heterogêneo na mistura solo-cimento e é natural que as características da estabilização sejam muito relacionadas com o seu comportamento e qualidade. É fundamental conhecer quais os solos mais adequados à estabilização com cimento, uma vez que podem não responder satisfatoriamente a resistência e a durabilidade, podendo exigir teores maiores de cimento e implicar em dificuldades de operações em campo (ALMEIDA, 2016).

A composição mineralógica e química do solo influencia muito o processo de estabilização com cimento. Solos cauliníticos e ílíticos são inertes e desenvolvem satisfatórias resistências com quantidades econômicas de cimento, não inibindo a hidratação e o endurecimento do cimento. Por outro lado, a presença de argilominerais montmoriloníticos retarda a hidratação do cimento, sendo mais adequada a estabilização com cal. A afinidade da cal com a montmorilonita reduz o pH da fase aquosa, consequentemente, retarda o endurecimento do gel de cimento e cristalização de novos minerais (CROFT, 1967).

2.6.2.3 Estabilização com ácido fosfórico e fosfato

Estes foram ocasionalmente utilizados para estradas na América do Norte, embora a maior parte em trechos experimentais. Bons resultados foram obtidos, no entanto este tipo de estabilização é considerado caro para circunstâncias normais, uma vez que as quantidades requeridas não são muito diferentes das exigências de cal ou cimento (DAY, 1999).

Segundo Day (1999), existem duas vantagens particulares no uso de ácido fosfórico ou fosfato: (1) o clorito mineral de argila bastante problemático (cujo comportamento com cal ou cimento não está bem definido) é dito que reage bem com ácido fosfórico; e (2) a ação dispersiva inicial do íon fosfato em argilas é uma ajuda considerável para a densificação (portanto, proporciona maiores forças e resistência melhorada, principalmente a geadas).

2.6.2.4 Estabilização com resinas

Vários estabilizadores de resina foram utilizados na Europa. O propósito de uma resina é atuar principalmente como um agente impermeabilizante no solo, embora certas resinas sintéticas também adicionem certa resistência através de uma maior coesão (DAY, 1999).

De acordo com Day (1999) a quantidade de resina utilizada é bastante crítica para o trabalho bem-sucedido, bem como o tipo de solo tratado. Uma vantagem potencial de estabilizadores de resina, que ainda não foi explorada, é a possibilidade de incorporar fibras na mistura tratada com resina, as quais formariam uma esteira de fibra no solo. Em teoria, esta composição deve apresentar valores mecânicos significativos.

2.6.2.7 Estabilização com polímeros

Segundo Day (1999) os estabilizadores de polímero se dividem em três grupos, catiônicos, aniônicos e não iônicos, os polímeros catiônicos são carregados positivamente

e formam uma forte ligação com as cargas negativas dos minerais de argila e sílica fina, isto melhora a estrutura do solo dando maior resistência ao cisalhar. O seu uso para a estabilização do solo em larga escala é extremamente limitado devido a uma série de fatores concorrentes, como custo, mistura, variabilidade, etc. A mistura, em particular, é difícil, uma vez que quantidades muito pequenas devem ser usadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de Estudo

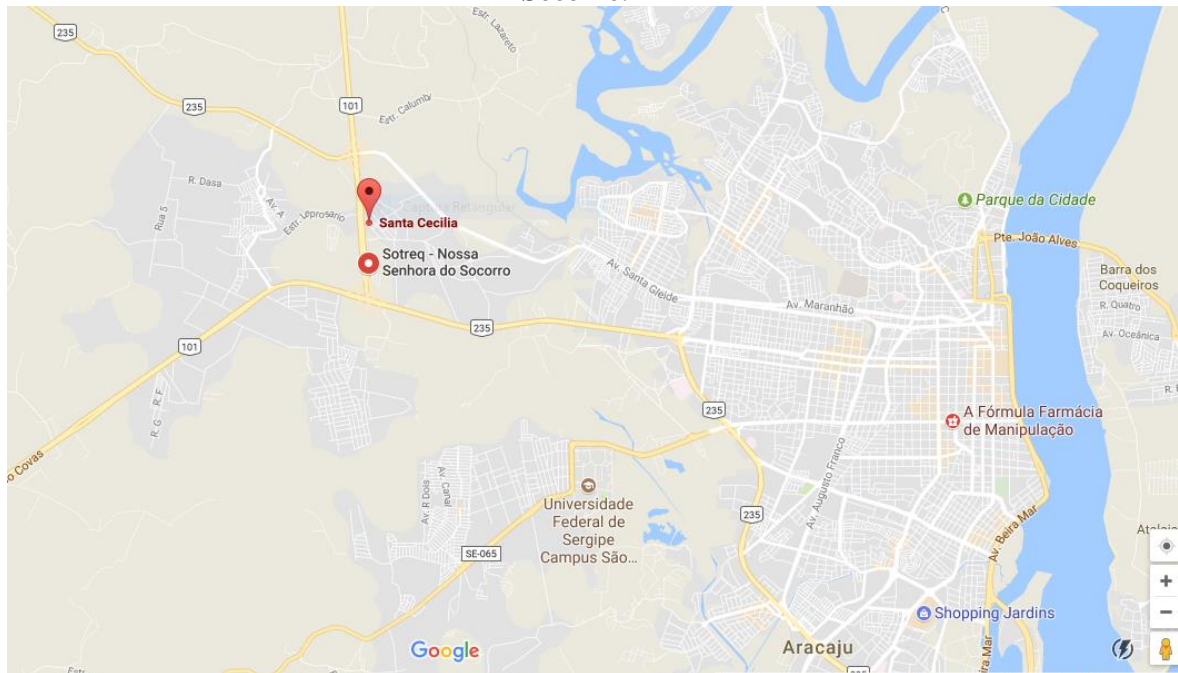
As amostras de solo expansivo foram coletadas com auxílio de funcionários da empresa Sonda Engenharia e Construções LTDA., num terreno do loteamento Santa Cecília, divisa com a BR-101, localizado no município de Nossa Senhora do Socorro, Estado de Sergipe, cuja área territorial tem aproximadamente 155 km², e população estimada em 2016 de 179.661 habitantes (IBGE, 2016). O local da coleta tem as coordenadas topográficas 10°51'18''S e 37° 07'33''O, e o clima da região é predominantemente tropical, com pluviosidade média anual de 1689 mm e temperatura média anual da ordem de 25,2 °C. A Figura 15 mostra o mapa do Estado de Sergipe, enquanto a Figura 16 apresenta um mapa contemplando a área de estudo.

Figura 15 – Mapa do Estado de Sergipe.



Fonte: Google Maps.

Figura 16 - Local de coleta da amostra – Loteamento Santa Cecília, Nossa Senhora do Socorro.



Fonte: Google Maps.

O material foi classificado tátil visualmente como um silte argiloso de cor cinza claro, classificado regionalmente como solo massapê, bastante comum no local, e famoso por causa das suas propriedades expansivas.

3.2 Materiais

3.2.1 Solo

Para a realização de ensaios em laboratório, foram coletadas amostras deformadas de solo massapê, o qual foi identificado tátil visualmente. O solo foi coletado durante um período chuvoso, no mês de julho, assim, não forneceu resistência à escavação. Na Figura 17 é mostrada uma imagem da escavação no momento da coleta.

Figura 17 - Coleta da amostra de solo a ser estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após coleta, o material foi transportado para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV) da UFS, onde foi colocado em bandejas (Figura 18) para perder umidade e então realizar-se o destorroamento e quarteamento das amostras, conforme mostrado na Figura 19. A etapa de secagem da amostra é fundamental para que se possa avaliar todo o potencial expansivo do solo natural, desde o menor de umidade ao máximo, obtido na saturação.

Figura 18 - Amostra em bandejas para secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Amostra de solo destorroad.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Polímero Industrial

O polímero industrial utilizado nesta pesquisa foi cedido ao GEOPAV pela empresa ViaEncosta Engenharia Ambiental, e é produzido pela DirtGlue Enterprises (DGE).

A DGE desenvolveu o sistema *TerraDry®*, o qual tem por finalidade tratar materiais de base de qualidade inferior "no próprio local", prometendo transformá-lo em material resistente e estável.

O polímero acrílico industrial é um material não contaminante e solúvel em presença d'água, que atua unindo as partículas de solo, tornando-o duro e resistente o suficiente, a ponto de suportar o carregamento gerado por veículos, em estradas de baixo volume de tráfego e estacionamentos. É também utilizável para controle de poeira e combate à erosão (Machado, 2016).

Juntamente com o polímero é utilizado um outro produto, com função de redutor de plasticidade, os quais, quando associados, facilitam a interação com o solo a fim de melhorar suas propriedades físicas e mecânicas. A Figura 20 mostra a imagem de amostras do polímero e do redutor de plasticidade usados nesta pesquisa. O polímero é nomeado também como emulsão aquosa polimérica acrílica e possui a seguinte composição:

- Polímero acrílico > 50% em peso;
- Água < 47% em peso;
- Amônia < 1% em peso;
- Aditivos não perigosos < 3% em peso.

Figura 20 - Amostra do polímero industrial e do redutor de plasticidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

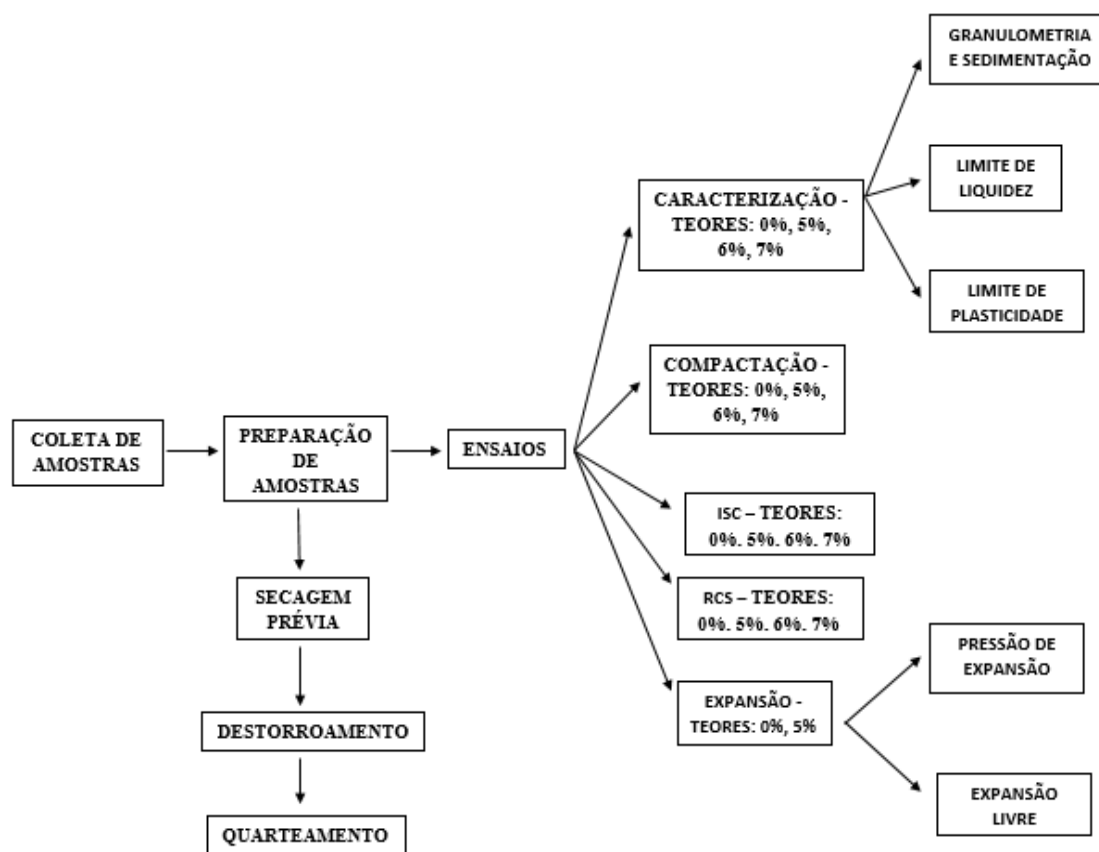
3.3 Metodologia

O estudo realizado seguiu as etapas conforme a Figura 21. Os ensaios foram realizados primeiramente com o solo puro e em seguida com a associação polimérica (polímero industrial + redutor de plasticidade) incorporado ao solo, com diferentes teores.

De acordo com orientações do fornecedor dos produtos, o polímero e o redutor de plasticidade são misturados entre si e utilizados em sua totalidade, ou seja, não podem ser guardados após misturados. Se após a aplicação dos produtos a umidade ótima do solo não for alcançada, poderá se adicionar água até alcançá-la. Devidos às funções do polímero industrial no solo, além dos ensaios realizados após a adição da substância no solo, foi definido também um tempo de cura de 7 dias dos corpos de prova para análise da redução do seu potencial expansivo e aumento da sua resistência mecânica.

Todos os ensaios foram realizados de forma duplicada, para melhor comparação e segurança nos resultados.

Figura 21 - Organograma das etapas para a realização da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.1 Adição do polímero industrial à amostra de solo

Para a determinação da quantidade de polímero a ser adicionada em cada mistura, foi utilizada a massa seca de solo puro da amostra. A partir da massa seca do solo, foram adicionados os teores de polímeros nos percentuais de 5%, 6% e 7%, ressaltando que esses percentuais poliméricos refere-se às composições de polímero industrial + redutor de plasticidade, que é feita da seguinte maneira: após a obtenção da massa seca da amostra, é calculado o percentual de polímero, por exemplo, para a mistura de 5% a quantidade necessária de polímero industrial é 100 ml, então, deve-se acrescentar 10% desse valor de redutor de plasticidade, que corresponde a 10 ml, assim a composição polimérica total é de 110 ml. As misturas foram realizadas com o auxílio da bandeja e colher de pedreiro, desfazendo-se os pequenos torrões ainda existentes no solo, a fim de aumentar a área específica onde o polímero industrial atua, além de tornar a mistura ainda mais homogênea.

Deve-se ressaltar que o polímero foi incorporado ao solo no instante da moldagem dos corpos de prova, e que os ensaios foram realizados imediatamente e 7 dias após sua moldagem.

Aspectos da preparação da mistura pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22 - Preparação da mistura do solo com a adição do polímero industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Ensaio de Caracterização

Para a caracterização do solo e das misturas solo-polímero, foram realizados ensaios rotineiros de Análise Granulométrica, Densidade Real e Limites de Atterberg. Para a execução destes ensaios foi utilizada a norma NBR 6457:1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

3.3.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo tem por finalidade obter quantitativamente a distribuição por tamanho das partículas presentes no solo, expressa como uma porcentagem em relação à massa seca total. Este ensaio foi realizado seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 7181:2016 – Solo – Análise Granulométrica, a qual expõe o método feito por peneiramento associado à sedimentação, com o uso de defloculante hexametáfosfato de sódio, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Peneiramento e Sedimentação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2.2 Densidade Real

A densidade dos grãos foi determinada através do método do picnômetro como mostra a Figura 24 de acordo com a norma DNER-ME 093/94 – Determinação da densidade real. Ressaltando que a densidade real se refere à relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas.

Figura 24 – Determinação da densidade real.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2.3 Limites de Atterberg

- Limite de Liquidez

O limite de liquidez é definido como o teor de umidade correspondente à passagem do estado plástico para o estado líquido. Este limite é referente à umidade com a qual se unem, em 13 mm de comprimento, dos bordos inferiores de uma ranhura – feita numa amostra de solo posicionada na concha do aparelho de Casagrande, normatizado, com seu cinzel, sob a ação de 25 golpes e com altura de queda de 1 cm. A Figura 25 mostra a execução do ensaio, o qual foi realizado de acordo com a norma NBR 6459:1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 - Execução do ensaio de Limite de Liquidez.

- Limite de Plasticidade

O limite de plasticidade refere-se ao teor de umidade que corresponde à transição do solo de estado semi-sólido para o estado plástico. Para a realização desse experimento, como mostra a Figura 26, é utilizado aproximadamente 50g de material, onde numa cápsula de porcelana se adiciona água lentamente, misturando-o até criar uma massa plástica homogênea. Com uma pequena quantidade de massa forma-se uma bola e então, é separada uma pequena porção a qual sofrerá uma leve pressão com a palma da mão rolando sobre a placa de vidro esmerilhada, a fim de formar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, após o aparecimento de pequenas fissuras, o cilindro é transferido em partes para um recipiente para a obtenção da umidade. Para a realização



deste ensaio, foi consultada a norma NBR 7180:1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

Figura 26 - Execução do ensaio de Limite de Plasticidade.**Fonte: Elaborado pelo autor.**

3.3.3 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação tem por finalidade diminuir o índice de vazios e elevar o peso específico seco, causando o aumento de sua resistência, transformando-o num solo mais estável. Além de reduzir o volume de vazios e elevar sua resistência, a compactação melhora a permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água (CAPUTO, 1988).

O princípio deste ensaio é a determinação do peso específico seco aparente máximo (γ_d) e seu correspondente teor de umidade, denominado teor de umidade ótimo ($W_{ót}$), para em seguida utilizar esses parâmetros na moldagem dos corpos de prova, tanto dos solos puros quanto das misturas solo-polímero, em seus diversos teores. Ressaltando que os ensaios de compactação, das misturas, foram executados após o período de uma hora de aeração. Segundo Ingles e Metcalf (1972) a aeração (Figura 27) antes da compactação aumenta a estabilidade e diminui a absorção de água.

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 7182:1986 – Solo – Ensaio de Compactação.

Foi utilizado o cilindro pequeno, estabelecido por Proctor, e a energia de Proctor Intermediário, com reuso de material, a execução do ensaio é ilustrado na Figura 28.

Figura 27 - Aeração da mistura solo-polímero para a execução do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Execução do ensaio de compactação.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC

A partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação, corpos de prova foram moldados para a determinação do valor de suporte e expansão do solo natural e das

misturas solo-polímero, conforme a Figura 29, o procedimento foi feito com base na norma NBR 9895:2016 – Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC). Foram ensaiadas amostras com e sem cura. As amostras que não passaram pelo processo de cura foram imersas em água, logo após à compactação, por um período de quatro dias, e as leituras de expansão foram feitas dia a dia através de extensômetros, como mostra a Figura 30.

Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Corpos de prova imersos em água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova que passaram pelo processo de cura, conforme a Figura 31, ficaram sete dias em câmara úmida, sob umidade aproximadamente de aproximadamente 80% e temperatura estável, por volta de 29 °C. Em seguida, foi adotado o mesmo procedimento de imersão por quatro dias para obtenção do ISC.

Figura 31 - Corpos de prova em processo de cura em câmara úmida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A prensa mecânica manual utilizada foi da marca Pavitest (Figura 32), com anel dinamométrico com capacidade de 4.000 Kgf e extensômetro de resolução de 0,001 mm.

Figura 32 - Prensa mecânica manual para execução do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.5 Resistência à Compressão Simples

Para a execução do ensaio foi utilizada a norma NBR 12770:1992 – Solo Coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada.

A Figura 33 ilustra a preparação do material para a moldagem dos copos de prova. As misturas foram preparadas para o ensaio de compressão simples, em seguida foram moldados 6 CPs para cada teor, 3 CPs para serem rompidos imediatamente após a moldagem e outros 3 CPs para serem rompidos após o tempo de cura de sete dias, em câmara úmida, como ilustrado na Figura 34. É importante ressaltar que para que não houvesse perda de umidade significativa durante a moldagem dos CPs, as quantidades de cada um dos seis eram colocadas em pequenas sacolas plásticas e acondicionadas em câmara úmida.

Figura 33 - (a) Preparação da mistura; (b) Repartição da amostras em pequenas sacolas plásticas para moldagem dos CPs; (c) moldagem dos CPs de RCS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - CPs em processo de cura em câmara úmida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto aos procedimentos de ruptura dos CPs (Figura 35), os ensaios foram realizados sob deformação controlada, utilizando-se a velocidade de 1mm/min, nas prensas de compressão simples.

Figura 35 - Rompimento dos CPs (a) com cura e (b) sem cura; (c) CPs rompidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.6 Expansão Livre e Pressão de Expansão

Os ensaios de Expansão Livre e Pressão de Expansão não possuem normas no Brasil. Dessa forma, para a realização desses ensaios é indicado seguir as recomendações da norma americana ASTM D – 4546 – 03. Dentre os métodos descritos na mencionada norma, foi adotado o método A.

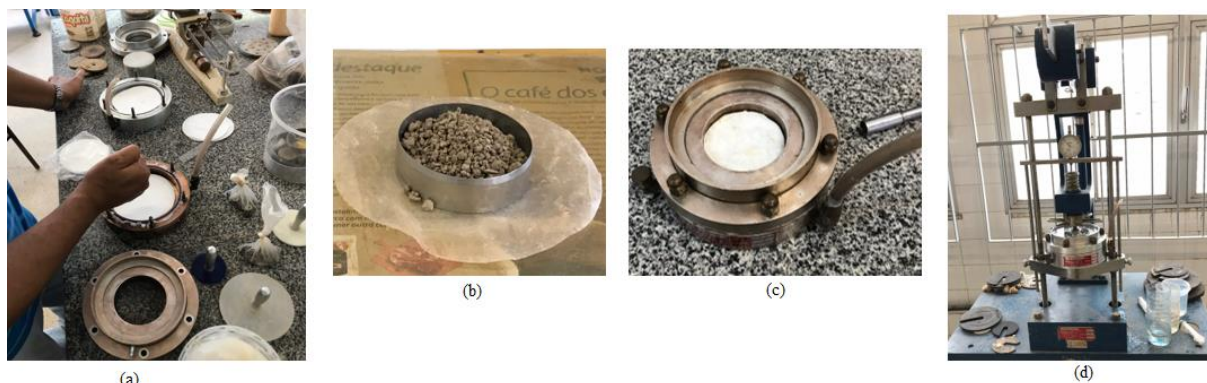
Os ensaios de expansão livre foram executados numa prensa, com anéis e células edométricos utilizados para o ensaios de adensamento. Os CPs foram moldados com parâmetros próximos aos obtidos no ensaio de compactação, peso específico aparente seco máximo e umidade ótima. Os anéis edométricos usados na moldagem dos CPs possuíam diâmetro interno de 71 mm e altura de 20 mm, além disso, foram utilizados filtros de papel e pedras porosas em ambas as faces, permitindo a passagem da água tanto pela base, quanto pelo topo do CP.

Em seguida a célula edométrica foi posicionada na prensa de adensamento e submetida a uma tensão de adensamento mínima de 1 kPa, como a norma recomenda. Decorridos cinco minutos, o extensômetro foi calibrado para a leitura inicial. Logo após, o CP foi submetido à inundação por ambas as faces, com água destilada, permitindo sua expansão axial. Esta expansão foi observada até que um valor constante ou próximo da invariabilidade fosse visto entre as leituras sucessivas, sendo realizadas leituras no

extensômetro, em geral, para os tempos de 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 15,0 e 30,0 minutos e 1, 2, 4, 6, 24, 48 e 72 horas após a adição de água. Vale ressaltar que os percentuais de expansão foram obtidos através da relação entre a deformação registrada no extensômetro e a altura inicial do corpo de prova.

A Figura 36 ilustra as etapas de preparação dos CPs e o posicionamento da célula edométrica na prensa de adensamento.

Figura 36 – (a) Preparação da célula; (b) Moldagem do CP; (c) Colocação do CP na célula e (d) Colocação da célula na prensa para execução do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados obtidos foram plotados gráficos onde a abscissa representa o tempo em escala logarítmica, e ordenada, seu percentual de expansão. Os ensaios foram realizados até que pudessem ser identificadas as expansões primária e secundária, definindo, assim, o valor final da expansividade da amostra.

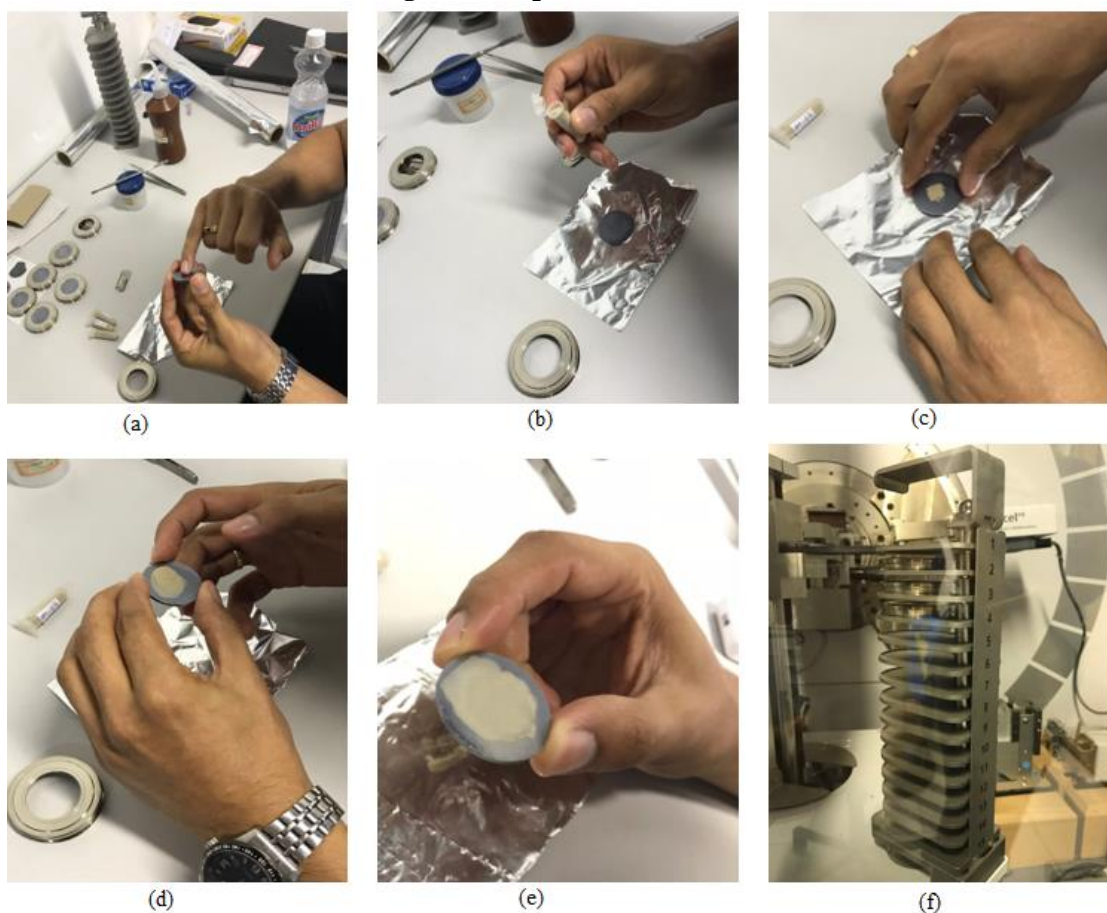
O ensaio de pressão de expansão foi realizado de forma semelhante, a preparação dos CPs seguiu o mesmo procedimento. Após a inundação da célula, foram feitas leituras no extensômetro até o instante que fosse identificado o fim da expansão primária, a partir deste ponto, foram acrescentadas sobrecargas sucessivas atuantes no topo do CP, a fim de impedir sua expansão. O acréscimo de sobrecargas foi encerrado quando o índice de vazios final se igualou ao índice de vazios inicial, ou seja, quando a altura do CP retornou a seu valor inicial e nenhuma expansão foi observada no extensômetro. Os resultados foram plotados num gráfico cuja abscissa representa a pressão aplicada, e ordenada, a expansão registrada.

3.3.7 Difração de raios-X

As medidas de DRX foram realizadas usando um difratômetro de raios X *Empyrean* de marca *Panalytical*. Nessa técnica, as amostras foram colocadas em um porta amostras de silício não orientado (zero *background*) e submetida a um feixe de raios X com radiação

$\text{CuK}\alpha$. Ao mesmo tempo, os raios X difratados, em função do ângulo 2θ , são coletados por um detector linear, num passo angular de $0,013^\circ$, com um tempo de exposição de 150 s por passo, num intervalo de 04 a 85 graus. A Figura 37 mostra toda a preparação para o ensaio de Difração de raios-X.

Figura 37 – (a) Preparação do porta amostra de silício não orientado; (b), (c) e (d) Colocação e espalhamento do solo no porta amostra; (e) Solo devidamente espalhado; (f) Magazine (Suporte de amostras).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas medidas foram utilizadas de modo a caracterizar estruturalmente as amostras de forma qualitativa. Para identificação das fases, foi utilizado o programa *X'Pert HighScore* da Phillips. Esse equipamento, citado acima, encontra-se no Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais Magnéticos do Departamento de Física do Campus Prof. Alberto Carvalho, na Universidade Federal de Sergipe (DFCI-UFS), sob a coordenação dos professores do GPMAT (Grupo de Pesquisa em Materiais).

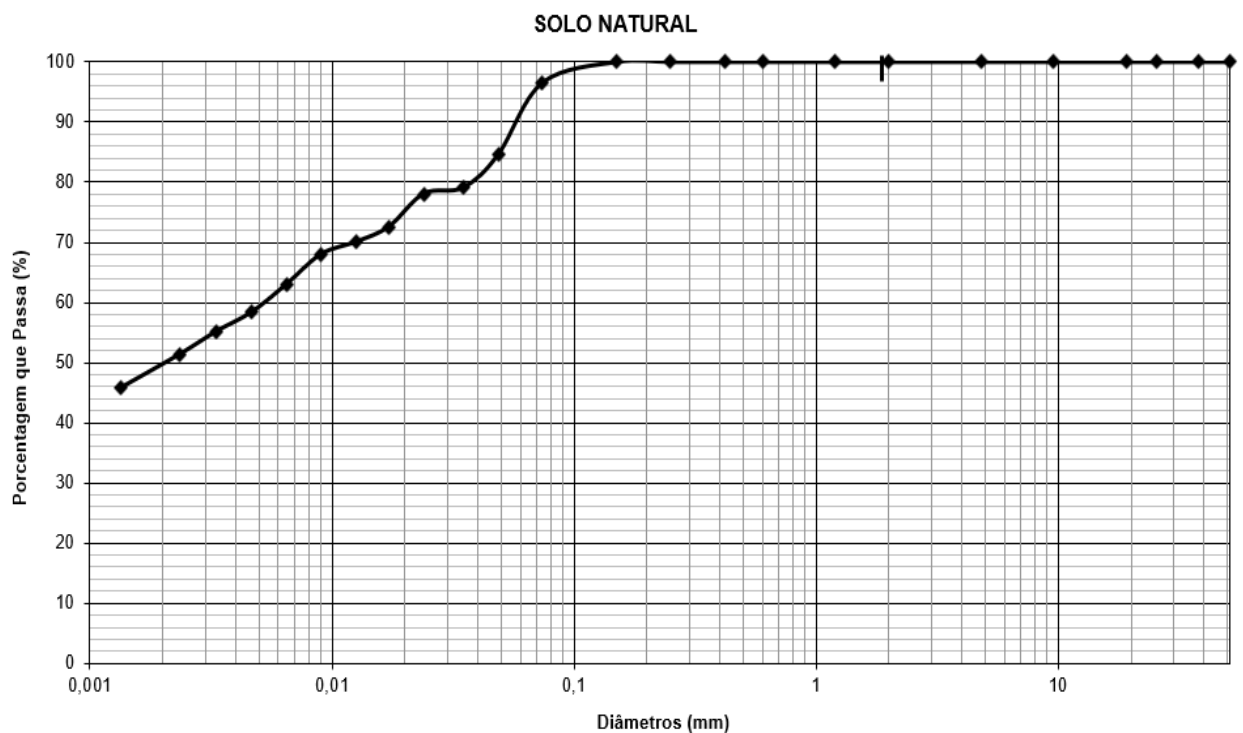
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados em laboratório com o solo puro e com as respectivas adições poliméricas.

4.1 Caracterização geotécnica do solo natural

A Figura 38 mostra a curva granulométrica do solo natural, enquanto a Tabela 4 apresenta um resumo das frações de pedregulho, areia, silte e argila, levando em consideração as faixas estabelecidas pela norma NBR 6502 (ABNT, 1995). O ensaio de análise granulométrica por peneiramento e sedimentação mostrou a predominância de material fino (silte e argila), que corresponde a cerca de 96,18% do solo natural, isto é, a fração passante na peneira n°. 200.

Figura 38 - Curva granulométrica do solo natural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Resumo granulométrico – Solo natural.

Fração	Solo natural
Pedregulho (%)	0,00
Areia (%)	3,83
Silte (%)	35,99
Argila (%)	60,19

Fonte: Elaborado pelo autor.

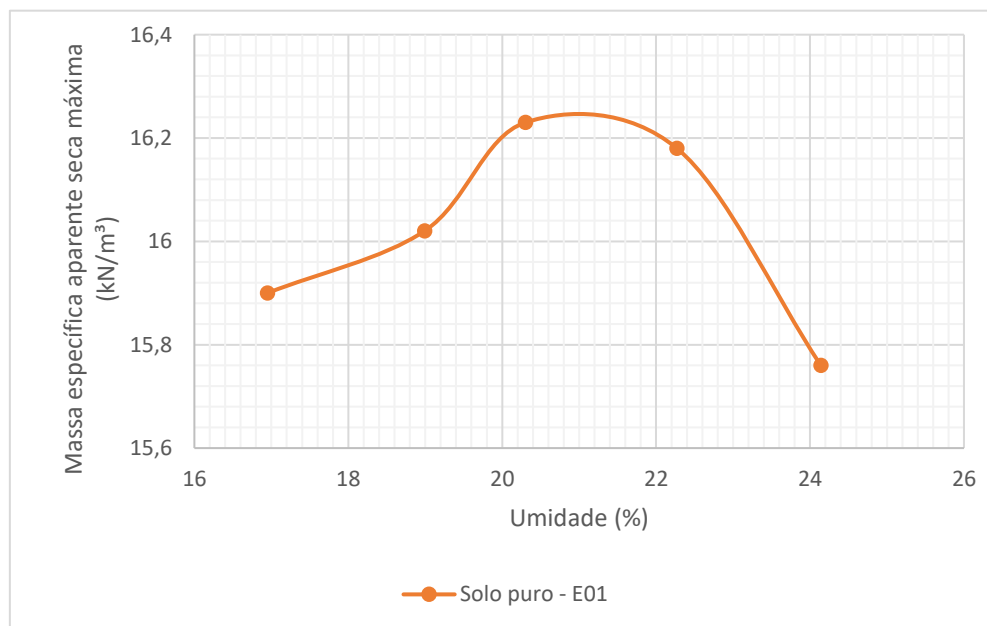
Os limites de liquidez e plasticidade obtidos para o solo foram 72% e 33%, respectivamente, resultando num índice de plasticidade (IP) igual a 39%, cujo índice caracteriza o solo natural, de acordo com SUCS, como um material de alta plasticidade.

De acordo com a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), o solo apresenta índice de grupo igual a 20 e pertence ao grupo A-7-5, por ser predominantemente argiloso, devido alta porcentagem de material passante na peneira n°. 200, Índice de Plasticidade superior a 30 e Limite de Liquidez maior que 70, os quais foram obtidos IP máximo igual a 39 e LL igual a 72%. De acordo com o segundo o Sistema Unificado de Classificação, o solo pode ser classificado como argila de alta compressibilidade – CH, por estar situado acima da linha A do gráfico de plasticidade de Casagrande e possuir limite de liquidez maior que 50%.

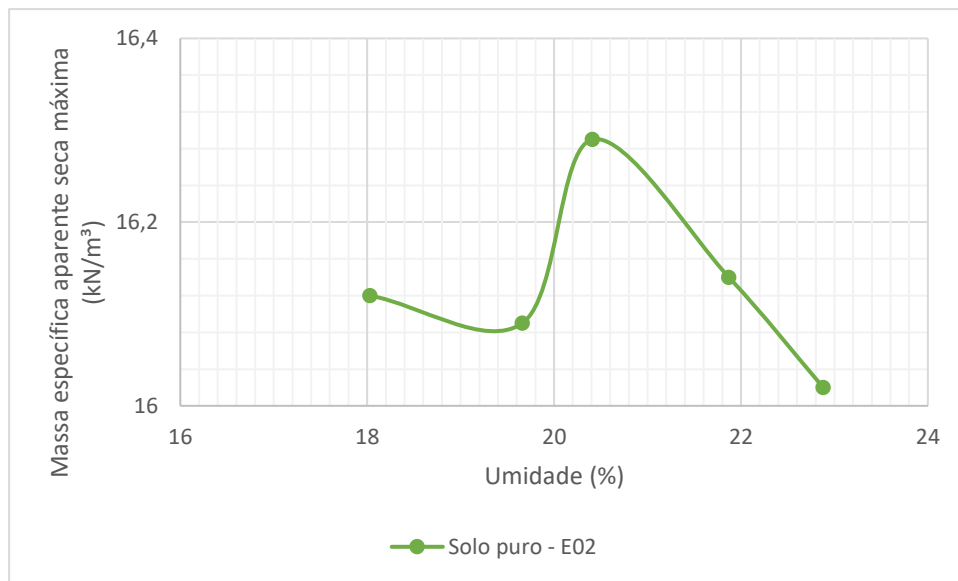
De acordo com o Índice de Atividade de Skempton, o solo em estudo possui um índice de atividade igual a 0,78 (IP corrigido/teor de argila). Dessa forma, com base no gráfico da **Figura 12**, que classifica a expansividade de um solo com base nos índices de Skempton, constatou-se que esse material possui um potencial expansivo muito alto.

A Figura 39 mostra a curva de compactação do solo natural. É possível notar um formato de sino, típico na maioria dos solos argilosos (DAS, 2007). A partir dos gráficos podem ser determinados os valores de $\gamma_{\text{máx}} = 16,27 \text{ kN/m}^3$ e $W_{\text{ótima}} = 20,7\%$, para o ensaio 01 e $\gamma_{\text{máx}} = 16,27 \text{ kN/m}^3$ e $W_{\text{ótima}} = 20,7\%$, para o ensaio 02.

Figura 39 - Curva de compactação do solo natural – Ensaio 01.



Fonte: Elaborado pelo autor.

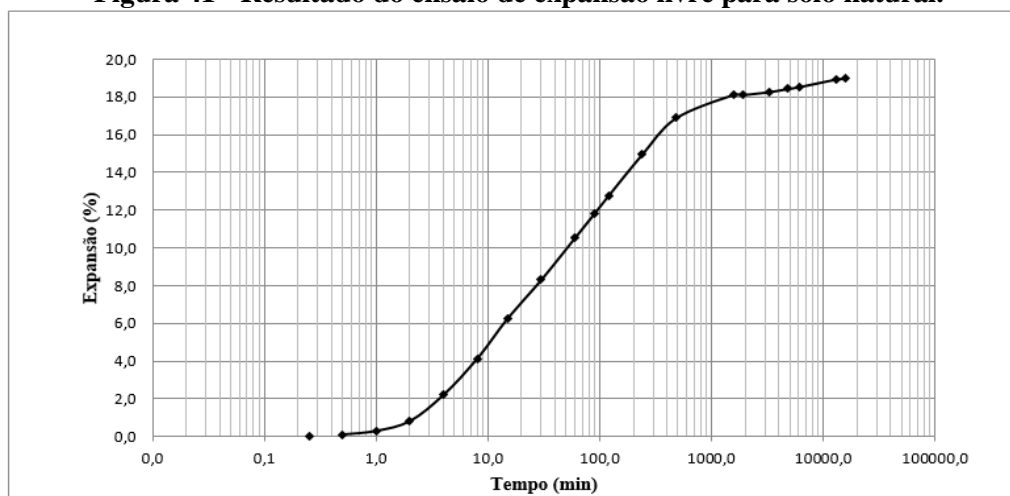
Figura 40 - Curva de compactação do solo natural – Ensaio 02.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao ISC o solo natural apresentou o valor de 2 e expansão de 9,12%, após 4 dias de submersão.

Por meio dos ensaios de compressão simples foi obtida o valor médio igual a 523,6 kPa, correspondente a 5,34 kg/cm² e coesão de 261,8 kPa, sem cura, e 2524,0 kPa, correspondente a 25,74 kg/cm² e coesão de 1262,0 kPa, com cura. Pode-se perceber que o solo, ao passar pelo processo de cura (descanso em câmara úmida), houve aumento de 382% da sua resistência.

O potencial expansivo do solo natural foi obtido através do ensaio de expansão livre, a Figura 41 ilustra o resultado.

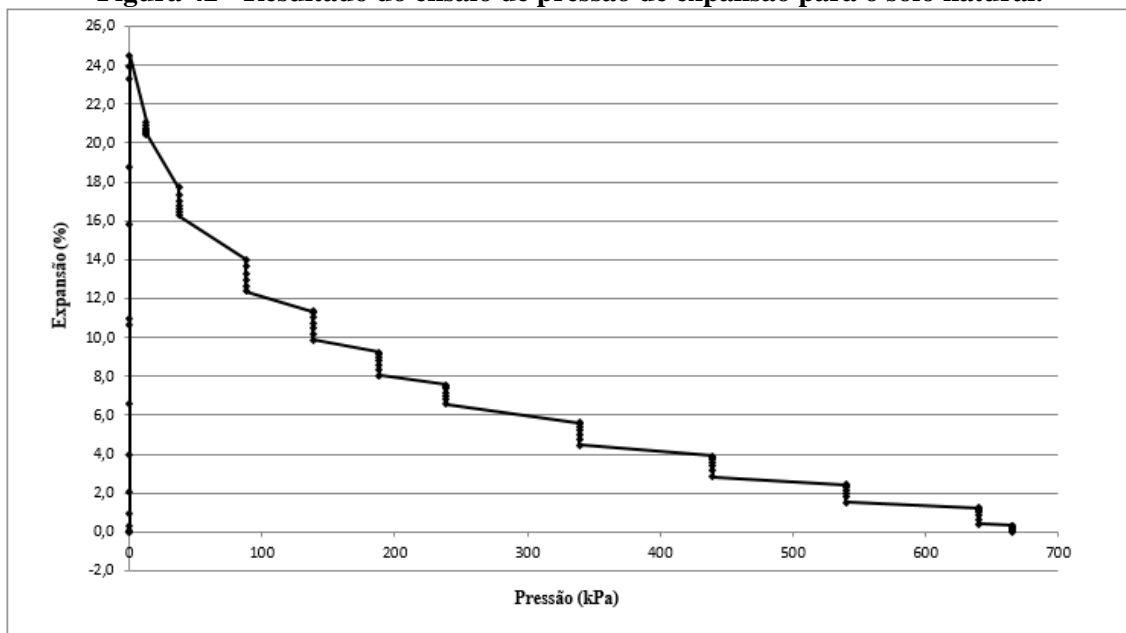
Figura 41 - Resultado do ensaio de expansão livre para solo natural.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o solo puro apresenta alto índice expansivo e atinge aproximadamente 19% de expansão no final do ensaio. A execução deste ensaio durou em torno de 10 dias e esta longa duração pode ser explicada devido a baixa permeabilidade do solo, ou seja, foi necessário mais tempo para saturar a amostra, e como consequência, alcançar leituras constantes no extensômetro. A umidade da amostra no início do ensaio foi correspondente a 18,80%, e no final do ensaio obteve-se umidade igual a 36,20%. Vale ressaltar que, o índice de vazios inicial determinado ao se usar os parâmetros ótimos obtidos na compactação foi de 0,673, aumentando para 1,096 ao finalizar o ensaio.

Observou-se que o solo puro possui alta pressão de expansão, como mostra o resultado exposto na Figura 42, alcançando em torno de 665,5 kPa ao finalizar o ensaio. O processo de adição de sobrecarga iniciou no dia seguinte, coincidindo com o fim da expansão primária. A umidade da amostra no início do ensaio foi correspondente a 18,80%, e no final do ensaio obteve-se umidade igual a 28,30%.

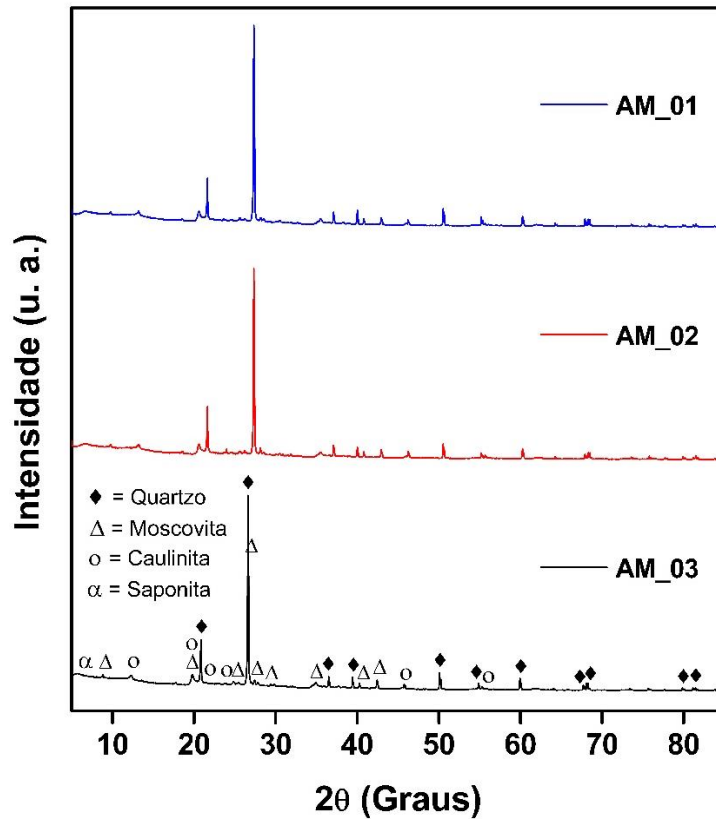
Figura 42 - Resultado do ensaio de pressão de expansão para o solo natural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os registros dos difratogramas de Raios-X, representados na Figura 43, apontam uma boa homogeneização na composição do solo, pois fora feitas medidas em três amostras distintas, identificando os mesmos padrões de DRX.

Figura 43 – Representação dos difratogramas obtidos para o solo natural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi identificada a presença de argilominerais dos grupos da montmorilonita (Saponita), das micas (Muscovita) e da caulinita, demonstrando a heterogeneidade de argilominerais expansivos presente no solo natural.

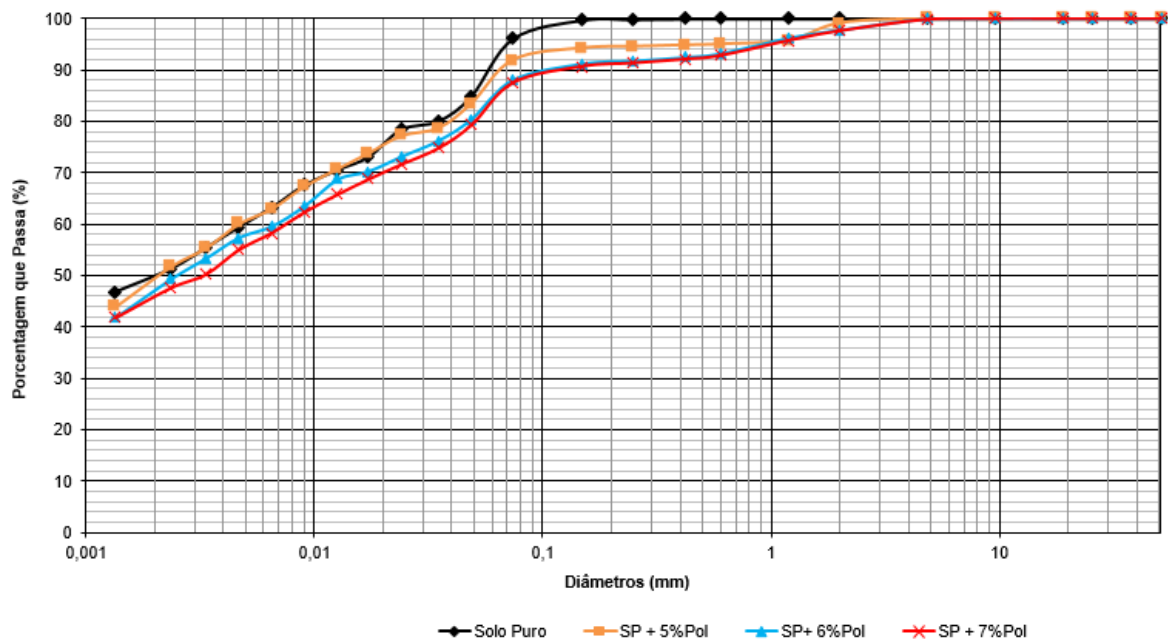
O grupo das esmectitas apresentam expansividade intracristalina, devido a água e líquidos orgânicos penetrarem entre as camadas, podendo também haver contração resultante da desidratação (DEER *et al.*, 1996). Já a muscovita não apresenta expansividade intracristalina, devido à forte ligação iônica gerada pelos íons K^+ entre as camadas estruturais (OLPHEN, 1963). A caulinita é o argilomineral mais comum em solos residuais maduros, por ser estável, não caracteriza o solo como problemático, é um solo mediantemente plástico e com comportamento não expansivo (CARVALHO, 1997). Além da presença de minerais como o quartzo.

4.2 Caracterização geotécnica das misturas

4.2.1 Análise granulométrica

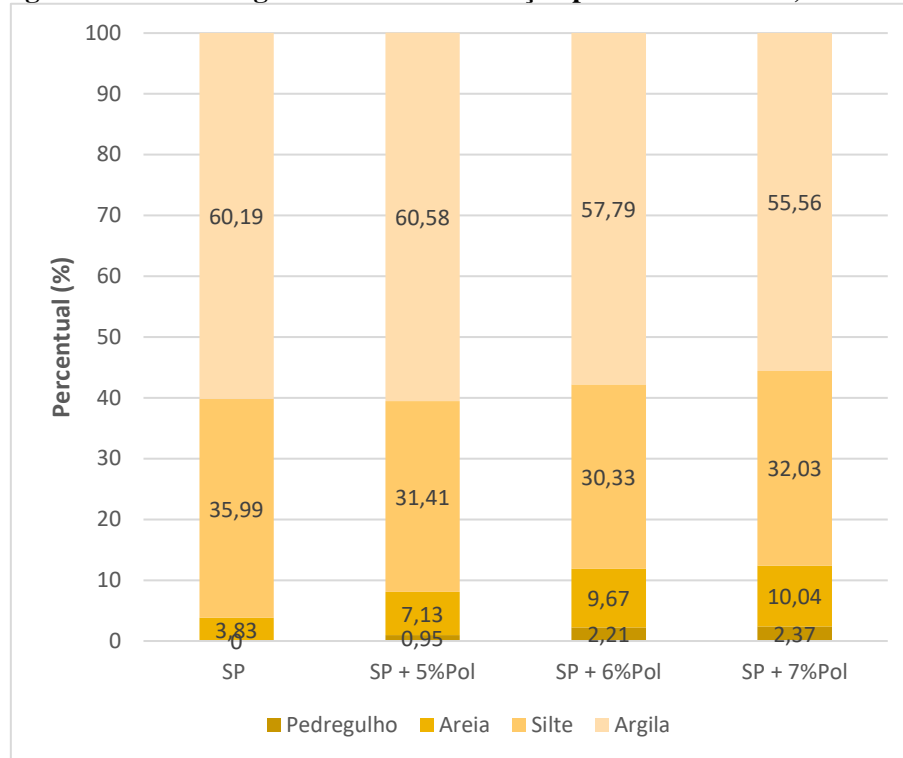
Os ensaios de análise granulométrica das misturas solo-polímero, com os teores de 5%, 6% e 7%, apresentaram as curvas granulométricas apresentadas na Figura 44.

Figura 44 - Curvas granulométricas – Adição polimérica de 5%, 6% e 7%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 45 mostra o resumo das frações de pedregulho, areia, silte e argila das misturas propostas. Da mesma figura se pode perceber que a fração de pedregulho não teve interferência significativa, uma vez que a porcentagem de areia passou de 3,83%, no solo puro, para 10,04% com a adição de 7% do polímero, e, com isso, as frações de silte e argila diminuiu.

Figura 45 - Resumo granulométrico – Adição polimérica de 5%, 6% e 7%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Massa específica real

Os valores de massa específica real obtidos para as amostras de solo puro e misturas com polímero são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica real dos materiais estudados.

Massa específica real (g/cm ³)	
Solo Puro	2,690
SP + 5%Pol	2,583
SP + 6%Pol	2,572
SP + 7%Pol	2,563

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o ensaio para determinação da massa específica percebeu-se que o polímero reveste o solo, formando uma película “plástica”, o que resulta na diminuição da massa específica real, visto que as partículas são menos densas que o solo natural.

4.2.3 Limites de Atterberg

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos no ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade, além da classificação do solo natural e das respectivas misturas poliméricas, em conformidade com os sistemas AASHTO e SUCS.

Tabela 6 - Limites de Atterberg e classificação das misturas.

Misturas	Resultados (%)	Classificação - AASHTO	Classificação - SUCS
Solo Puro	Limite de Liquidez → 72 Limite de Plasticidade → 33 Índice de Plasticidade → 39	A-7-5	CH
Solo Puro + 5%Pol	Limite de Liquidez → 68 Limite de Plasticidade → 31 Índice de Plasticidade → 37	A-7-5	CH
Solo Puro + 6%Pol	Limite de Liquidez → 61 Limite de Plasticidade → 31 Índice de Plasticidade → 30	A-7-5	CH
Solo Puro + 7%Pol	Limite de Liquidez → 63 Limite de Plasticidade → 30 Índice de Plasticidade → 31	A-7-5	CH

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Tabela 6 se pode notar que não houve alteração na classificação das misturas comparadas ao solo puro, sendo todas classificadas como solo A-7-5 (sistema AASHTO), e, de forma análoga, os Limites de Atterberg também apresentaram poucas mudanças.

4.3 Compactação

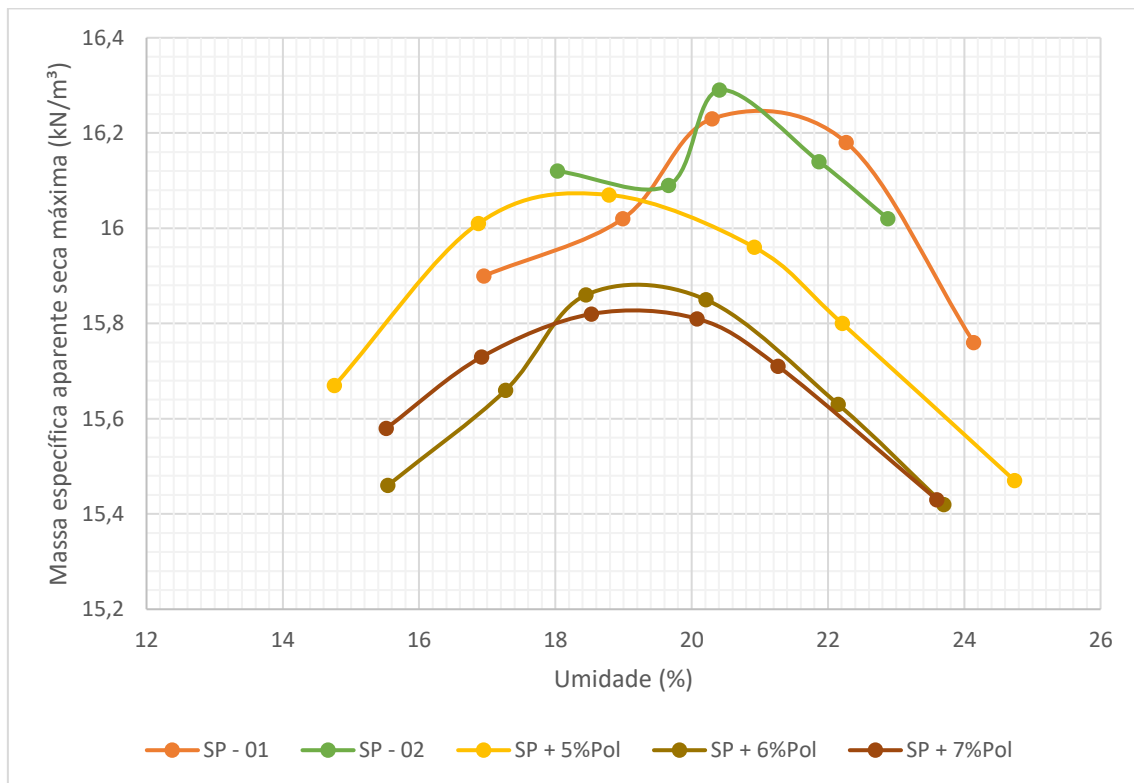
Os ensaios de compactação foram realizados com energia de Proctor Intermediário, no solo puro e nas misturas solo-polímero, os valores obtidos para os parâmetros de compactação, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros de compactação.

Misturas	Umidade Ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (kN/m³)
Solo Puro – E01	20,7	16,24
Solo Puro – E 02	20,4	16,29
SP + 5%Pol	18,7	16,01
SP + 6%Pol	19,1	15,88
SP + 7%Pol	19,2	15,83

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 46 ilustra as curvas de compactação para cada mistura solo-polímero.

Figura 46 - Curvas de compactação: misturas solo-polímero.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que ao se adicionar polímero ao solo houve redução tanto da umidade ótima, quanto da massa específica aparente seca máxima. A medida que o teor de polímero aumenta, há uma redução da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima. Isto se dá devido ao envolvimento das partículas de solo na solução polimérica, diminuindo sua densidade, formado partículas maiores e, conseqüentemente maiores vazios, os quais serão preenchidos pelo próprio polímero ou por água, justificando o aumento da umidade.

4.4 Índice de Suporte Califórnia - ISC

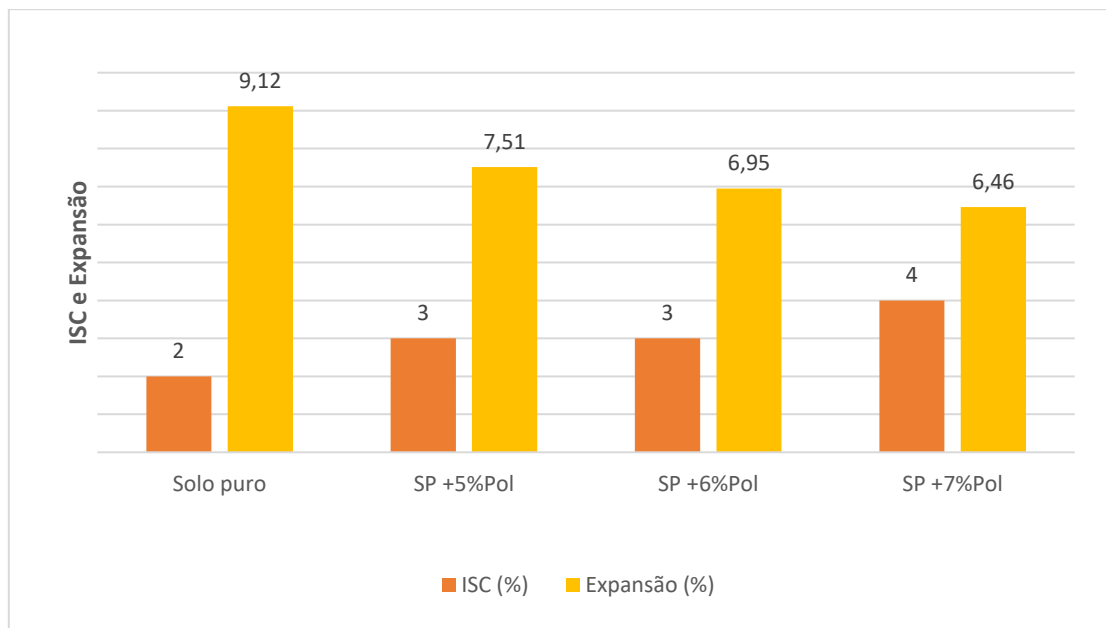
Os corpos de prova utilizados para a realização desse ensaio foram moldados com o teor de umidade próximos aos ensaios de compactação. A Tabela 8 mostra os valores de ISC e expansão obtidos dos ensaios com o solo puro e com as misturas preparadas com 5%, 6% e 7% de polímero, sem cura e com cura, respectivamente.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de ISC, sem cura e com cura.

Misturas	Sem cura		Com cura	
	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)
Solo puro	2	9,12	2	7,20
SP + 5%Pol	3	7,51	11	4,23
SP + 6%Pol	3	6,95	12	2,69
SP + 7%Pol	4	6,46	12	2,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

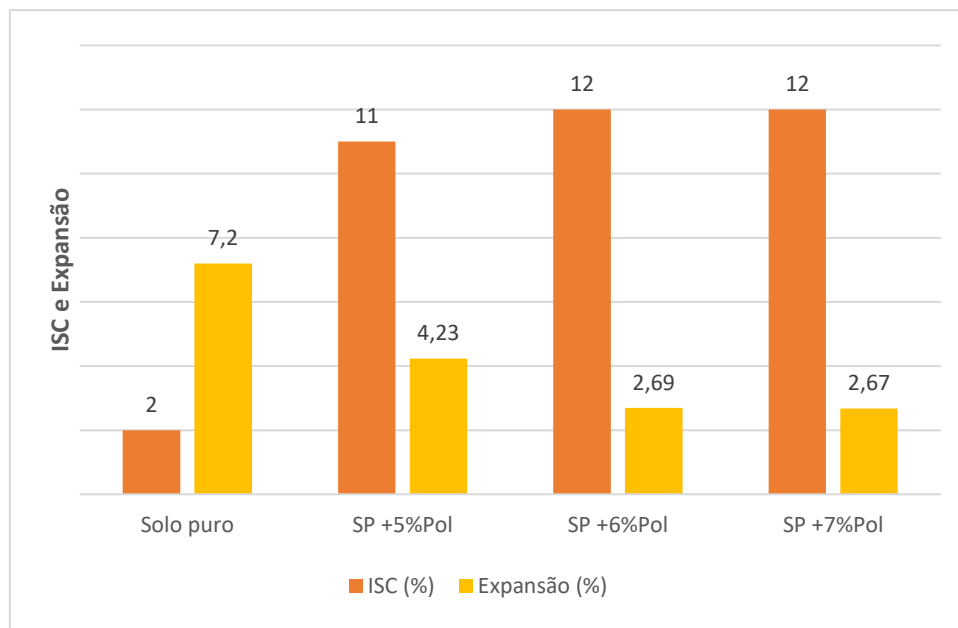
As Figuras 46 e 47 apresentam os resultados obtidos dos ensaios de ISC, ilustrando graficamente o que consta na Tabela 8. Com base nos valores obtidos sem cura, pode-se notar que o composto polimérico não provocou melhoramento significativo no valor da capacidade de suporte do solo. Outro aspecto observado nos resultados obtidos foi seu comportamento expansivo durante 4 dias imerso em água. Em que pese a diminuição da expansão com o aumento do teor de polímero, o menor valor da expansão obtido (para as amostras com 7% de polímero e cura de sete dias) ainda pode ser considerado elevado (2,67%), fator considerado negativo às especificações dos materiais empregados em pavimentos e fundações. Este fato revela uma maior tendência de variação do volume da camada granular quando totalmente saturada, uma vez que os solos expandem quando umedecidos, eles contraem quando ressecados, fazendo com que esse ciclo de expansão-contração ocasione trincamentos e deterioração da camada compactada.

Figura 47 - Valores obtidos no ensaio de ISC para solo puro e misturas, sem cura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as amostras que passaram pelo processo de cura, observou-se que o ISC teve aumento significativo, passando de 3%, na adição de 5% de polímero sem cura, para 11% com cura, que se manteve praticamente estável até a composição polimérica de 7%. Conforme já mencionado, houve redução gradativa da expansão, mas, no entanto, os valores ainda são considerados altos para obras de engenharia.

Figura 48 - Valores obtidos no ensaio de ISC para solo puro e misturas, com cura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Resistência à Compressão Simples - RCS

Os ensaios de resistência à compressão simples serviram para verificar o comportamento da mistura de solo com polímero industrial, comparando os resultados de resistências obtidos das amostras sem cura e com cura, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de RCS, sem cura e com cura.

Misturas	Sem cura	Com cura
	RCS (kPa)	RCS (kPa)
Solo puro	523,6	2524
SP + 5%Pol	435,3	1969,3
SP + 6%Pol	464,6	1791,5
SP + 7%Pol	490,5	1912,9

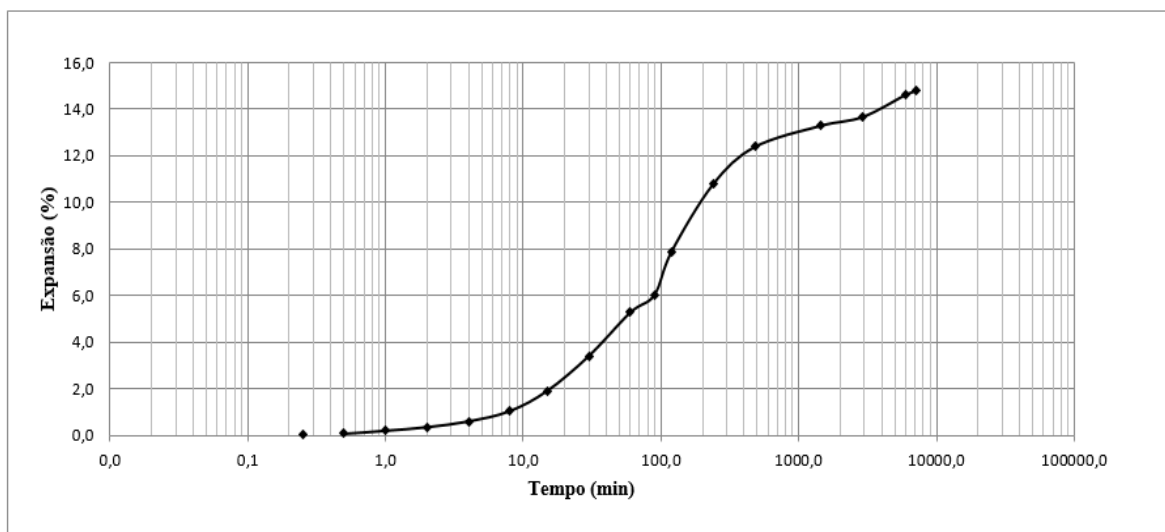
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes resultados pode-se verificar a variação de RCS entres os CP's sem cura e com cura.

4.6 Expansão Livre

Analisando o resultado obtido através do ensaio, mistura do solo com adição de 5% de polímero, conforme a Figura 48 verificou-se uma redução de aproximadamente 18% no valor da expansão, saindo de 18% para 14,8%, respectivamente. Este ensaio tem duração de aproximadamente 5 dias. A umidade da amostra no início do ensaio foi correspondente a 21,2%, e no final do ensaio obteve-se umidade igual a 31,80%. Ressaltando que os índices de vazios inicial obtidos utilizando os parâmetros ótimos da compactação foi de 0,650, aumentando para 0,894 ao final do ensaio.

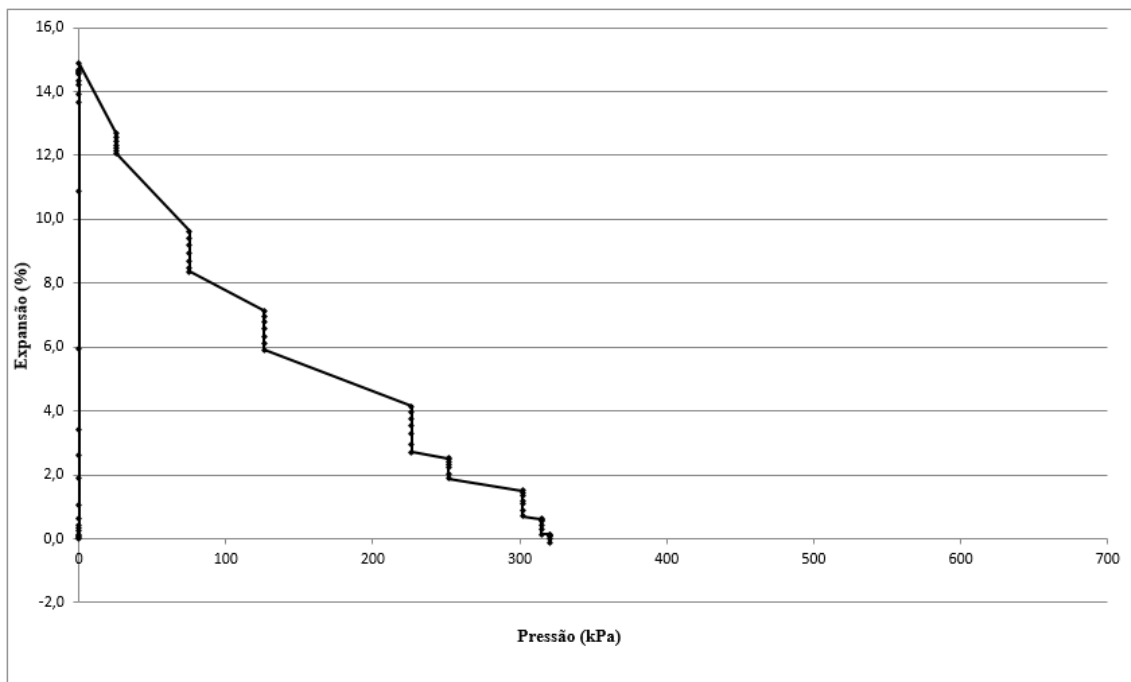
Figura 49- Resultado do ensaio de expansão livre para SP + 5%Pol.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Pressão de Expansão

A Figura 49 mostra o resultado da pressão necessária para impedir a expansão do solo natural com adição de 5% de polímero, analisando a mistura, verificou-se que a pressão de expansão reduziu em aproximadamente 48%, passando de 665,5 kPa para 346,1 kPa. A umidade da amostra no início do ensaio foi correspondente a 21,3%, e no final do ensaio obteve-se umidade igual a 28,9%.

Figura 50 - Resultado do ensaio de pressão de expansão para SP + 5%Pol.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou avaliar o efeito da adição de polímero industrial na tentativa de estabilização de um solo expansivo extensivamente encontrando na zona Norte da área metropolitana de Aracaju. Para tanto, foi analisada em laboratório uma amostra de solo do tipo massapê, proveniente do Loteamento Santa Cecília, em Nossa Senhora do Socorro – Sergipe. Após a realização dos ensaios de físicos e mecânicos, o solo natural foi identificado e classificado como alto grau de expansão, apresentando elevada fração de argila (cerca de 60%), alta plasticidade (IP igual a 39), baixa capacidade de suporte, ISC igual a 2%, RCS em torno de 0,5 MPa, expansão livre da ordem de 19% e pressão de expansão de 665,5 kPa, o maior valor já obtido com as argilas expansivas de Sergipe. Além disso, foi realizado o ensaio de difração de raios-X com a finalidade de detectar a presença do argilomineral expansivo, tendo sido encontrado a saponita, o qual é um tipo de esmectita que apresenta expansividade intracristalina acentuada quando em contato com água.

A tentativa de estabilização por meio da adição do polímero industrial não foi satisfatória, ocorrendo poucas alterações no solo natural. Pode-se observar que ao se adicionar polímero ao solo nos percentuais utilizados nesta pesquisa não ocorreu mudança significativa no teor de argila, e, conseqüentemente, na plasticidade, representada pelo valor do IP, sendo todas as amostras (solo puro e mistura) classificadas como A-7-5 e CH, pelo sistema AASTHO e SUCS, respectivamente.

Analisando-se os parâmetros de compactação, foi observado que a mistura solo-polímero apresentou redução tanto no valor da umidade ótima, quanto no da massa específica aparente seca máxima. A mistura contendo 7% de polímero apresentou uma redução de 7,2% na umidade ótima e 2,7% na massa específica aparente seca máxima.

A capacidade de suporte não obteve melhorias para os CP's sem cura. No entanto, com processo de cura houve aumento significativo no valor do Índice de Suporte Califórnia, cerca de 500%, nas adições de 6% e 7% de polímero, e redução de 70% na expansão, em relação ao solo natural. Mesmo assim, cabe destacar que os valores de ISC e expansão obtidos dessas misturas ainda continuam sendo insatisfatórios para obras geotécnicas, pois o ISC e expansão caminham juntos, ou seja, mesmo o ISC passando de 2% para 14%, com 7% de polímero a expansão correspondente é 2,67%, considerada alta para pavimentação, por exemplo, não atendendo, portanto, às especificações rodoviárias.

A adição do polímero também promoveu alteração na resistência à compressão simples dos CP's com cura, passando de 0,5 MPa, para 1,9 MPa, valor este obtido da mistura composta de solo puro mais 7% de polímero, sem cura e com cura, respectivamente.

Quanto à expansão livre, a adição de 5% de polímero ao solo natural mostrou uma redução de aproximadamente 18%, enquanto que a pressão de expansão foi reduzida em cerca de 48%.

Vale ressaltar que não deu tempo se concluir os ensaios de expansão livre e pressão de expansão para os demais teores de polímero e para CP's com cura, mas, estão em andamento.

As pesquisas não se limitam à aquela realizada neste trabalho. Como sugestão para a realização de trabalhos futuros e avaliação ainda mais aprofundada sobre solos expansivos são sugeridos:

- Análise quantitativa dos argilominerálias presentes no solo;
- Trabalhar em parceria com o Departamento de Química, para que possa desenvolver polímeros que reajam com os argilominerais expansivos presentes no solo;
- Verificar o comportamento do solo expansivo através da adição do acetato de polivinilo, constituinte de uma classe de polímeros que busca melhorias nas propriedades de expansão e contração do solo expansivo.

AGRADECIMENTOS

- Laboratório de Geotecnia e Pavimentação – GEOPAV;
- Laboratório de Física do campus Itabaiana, onde foi realizado o DRX.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **A importância dos solos não saturados em destaque no mês de novembro.** Fortaleza. 2015. Disponível em: < <https://www.abms.com.br/a-importancia-dos-solos-nao-saturados-em-destaque-no-mes-de-novembro/>>. Acesso em 27/12/2016.

ALMEIDA, G. B. de O., **Incorporação de Escória de Cobre Pós-Jateada a um Solo Arenoso-Argiloso de Sergipe para Aplicação em Base de Pavimentos.** Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. 2016. (Tese de Doutorado).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4546:** Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils. Pennsylvania. 2003. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** 2016. 8p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** 2016. 5 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade.** 2016. 3 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** 2016. 12 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 2016. 9 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** 2016. 14 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada - Método de ensaio.** 1992. 4 p. Rio de Janeiro.

AYALA, J.F., GIJON, M. F., MOZO, C. O. e RODRIGUEZ J. L. S. **Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argilas Em España a Escala 1:1.000.000.** Série: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Públicas. España, Madrid, 1986.

AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. e RAMALHO, R. W. **Estabilização de solos com adição de cal.** IPC/PUC. Belo Horizonte, 1998. (Dissertação de Mestrado).

- BAPTISTA, C. F. N. **Ensaio Fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre. 1976.
- BAPTISTA, C. F. N. **Pavimentação: Tomo I: ensaios fundamentais para pavimentação, dimensionamento dos pavimentos flexíveis**. 3 Ed. Porto Alegre: Globo. 1978.
- BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013. (Dissertação de Mestrado).
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Vol. 1. 1988.
- CARVALHO, A. L. de. **Análise do efeito da estabilização mecânica e física em matrizes de terra**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011. (Iniciação Científica).
- CARVALHO, J. B. Q. de. **Fundamentos da Mecânica dos Solos**. 1º ed., Campina Grande – Paraíba, Ed Marcone. 1997.
- CASANOVA, F.J. **Fundamentos (mecanismo) da dosagem físico-química do solo-cimento**. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO, 26., Aracaju. *Anais*. Aracaju. 1992.
- CASANOVA, F.J. (1986). **O Ensaio de Azul de Metileno na Caracterização de Solos Lateríticos**. In: ANAIS DA 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. *Anais*. Salvador, BA. 1986. V2, p. 276-286.
- CAVALCANTE, E. H., CAVALCANTI JÚNIOR, D. de A., SANTOS, W. J., & SOUZA NETO, J. B. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe**. In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - II GeoJovem, Nova Friburgo/RJ. 2006.
- CAVALCANTE, E. et al. **Caracterização de um solo expansivo, não saturado, de Sergipe**. 2007.
- CHEN, F. H. **The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soil. Concluding Proc. Eng. Effects of moisture changes in soils, Int. Res. Eng. Conf. Expansive clay soils, supplementing the symposium in print**. Texas: A & M Press. 1965. p. 152 – 171.
- CHEN, T.J.; SANTOS, P.S.; FERREIRA, H.C.; CALIL, S.F.; ZANDONADI, A.R.; CAMPOS, L.V. **Determinação da Capacidade de Trocas de Cátions e da Área Específica de Algumas Argilas e Caulins Cerâmicos Brasileiros pelo Azul de Metileno e sua Correlação com Algumas Propriedades Tecnológicas**. Cerâmica. Vol XX. Nº 79. São Paulo, SP. 1974. p. 305-326.
- COSTA NUNES, A. J., VASCONCELOS, E.M., PANDOLFI, R.M. **Ocorrências e propriedades de engenharia de solos expansivos na área do grande Recife**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.2, p. 193-209, Olinda/Recife. 1982.

CROFT, J.B. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. **Geotechnique**, n. 17, 1967. p. 119-135.

Cullity B. D. **Elements of X-Ray diffraction**. Addison Wesley Publishing Company Inc. 1972.

DAY, R. W. **Geotechnical and Foundation Engineering: Design and Construction**. McGraw-Hill Companies. New York. 1999.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas – Uma Introdução**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 558p. 1966.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093/94 – Determinação da densidade real**. 1994.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devido à inundação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. (Tese de Doutorado).

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão em solos naturais não saturados devidos à inundação**. Rio de Janeiro, VI, 381 (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil. 1995. (Tese de Doutorado).

FERREIRA, S. R. M. **Mapa de Risco a Colapsibilidade e Expansividade de Solo do Estado de Pernambuco – Geotecnia Ambiental**. Relatório Técnico do CNPq. 1999.

FERREIRA, S.R.M. **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil**. In: Simpósio Brasileiro De Solos Não Saturados, 7, v.2. p. 593- 619, Salvador. 2008.

FRAZÃO, E. B. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – São Paulo. 1981. (Dissertação de Mestrado).

GILLOTT, J. E. **Clay in Engineering Geology**. Elsevier Publ. Company, Amsterdam. 1987.

GOMES, C. F. **Argilas. O que são e para que servem**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. 1986.

GOOGLE MAPS, 2017. **Loteamento Santa Cecília – Nossa Senhora do Socorro**. Disponível em:
<<https://www.google.com.br/maps/search/loteamento+santa+cecilia+nossa+senhora+do+socorro/@-10.9056549,-37.1214386,13z>> Acesso em 10/10/2017.

GRIM, R. E. **Applied clay mineralogy**. McGraw-Hill Publ. Company Ltda, New York, 1962.

GUIMARÃES, J. E. **A cal. Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. 2. Edi. São Paulo: Pini. 2002.

HANG, P.T.; BRINDLEY, G.W. **Methylene Blue Absorption by Clay Minerals – Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities (Clay-Organic Studies XVIII)**. Clays and Clay Minerals. Vol. 18, p.203-212. Inglaterra. 1970.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization - principles and practice**. Sideney: Butterworks, 1972.

JENNINGS, J. E. **The Engineering significance of construction on dry subsoils**. Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils, Haifa, Vol II. 1973.

JEREMIAS, F. T. S. A. A. (1991). **Importância da expansibilidade na durabilidade dos materiais rochosos e técnicas laboratoriais para a sua avaliação**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa. 1991. (Dissertação de Mestrado).

JONES, D. E. e Holtz, W. G. 1974. **Expansive soils – the hidden disaster**. Civil Eng., ASCE, New York, NY pp 87-89, Aug. 1973.

JONES, D. E. e Jones, K. A. **Treating Expansive Soils**. Civil Engineering Magazine, ASCE, Vol. 57, N° 8. 1987.

LAMBE, T. W. e Whitman, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley & Sons, New York. (1969).

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004. (Dissertação de Mestrado).

MACHADO, L. F. M. **Adição de polímero acrílico em solo silto-argiloso de Sergipe para fins de pavimentação**. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2016. (Dissertação de Mestrado).

MERCK & CO. **The Merck Index of Chemical and Drugs**. Rahway, Merck & CO., Inco. 1952.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2° ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1976.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils**. Problems and practice in foundation and pavement engineering. 1992.

OLIVEIRA, A. G. d. S.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. **Estudo geológico-geotécnico dos solos expansivos da região do recôncavo baiano**. II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos-II Geojovem, Nova Friburgo/RJ. 2006.

OLPHEN, H. V. **An introduction to clay colloid chemistry**. Willey Interscience, New York. 1963.

PAIVA, W. de. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2009. (Tese de Doutorado).

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004. (Tese de Doutorado).

PRADO LEITE, R. **Estabilização de solo expansivo através da adição de cal.** Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2015. (Trabalho de Conclusão de Curso).

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada.** Centro de Estudios y Experiminetación de Obras Públicas. Madrid. 1984.

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2ª Edição. São Paulo. Edgard Blucher, Vol 1. 1989.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2 ed. São Paulo. Editora Pini Ltda. 2001.

SIMMES, P.R.M., COSTA FILHO, L.M. **Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano.** In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais. Rio de Janeiro. 1981.

SKEMPTON, A.W. The colloidal activity of clays, In: **Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engeneering.** 3. v.1, London. 1953

SOBRAL, H.S., **Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção.** Tese para Cátedra de Matérias de Construção, Universidade Federal da Bahia, Escola de Belas Artes, Salvador, BA. 1956.

THOMÉ, A. **Estudo do comportamento de um solo tratado com cal, visando uso em fundações superficiais.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1994. (Dissertação de Mestrado).

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: McGraw Hill do Brasil Ltda. 1977.

VARGAS, M. **The concept of tropical Soils.** In: Proceedings of the International Conference Geomechanics Tropical Lateritic And Saprolitic Soils,1, v.1, p. 101-134, Brasília. 1985.

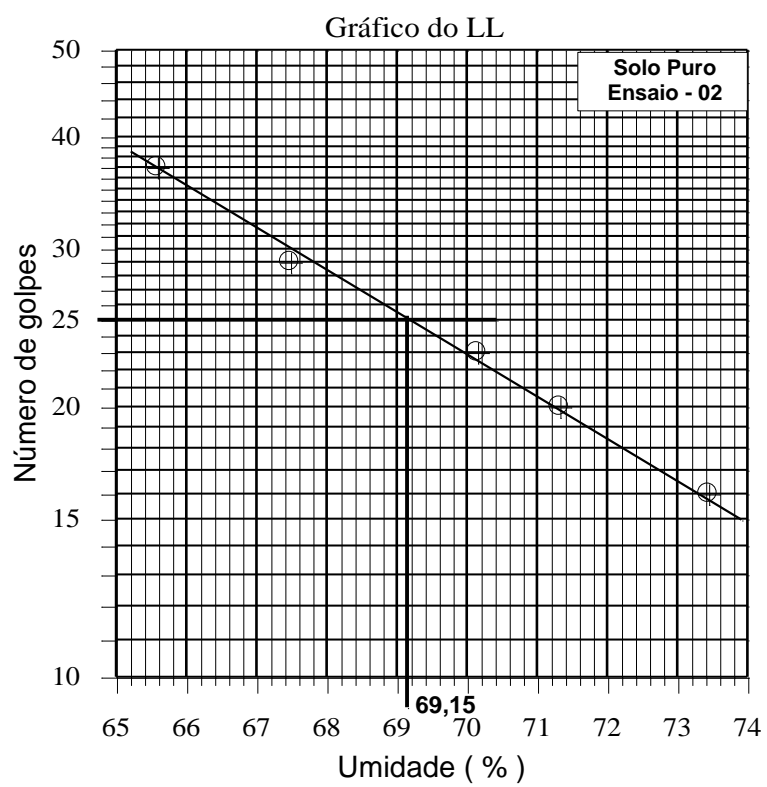
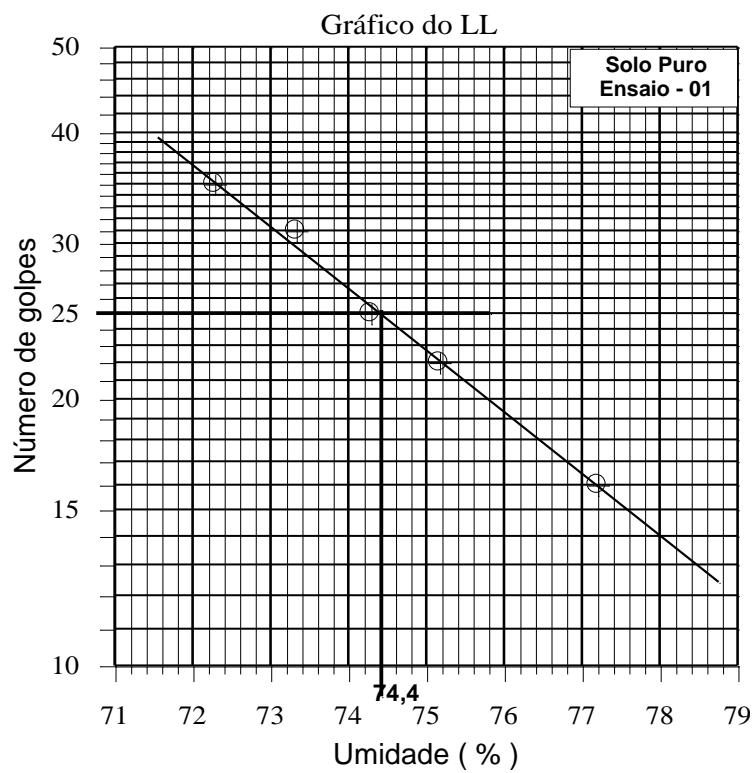
WILLIAMS, A. A. B. & DONALDSON, G. W. (1980). **Building on expansive soils in South Africa: 1973 – 1980.** Proceedings 4th International Conference on Expansive Soils, Vol II, Denver, Colorado. 1963. p. 834 - 844.

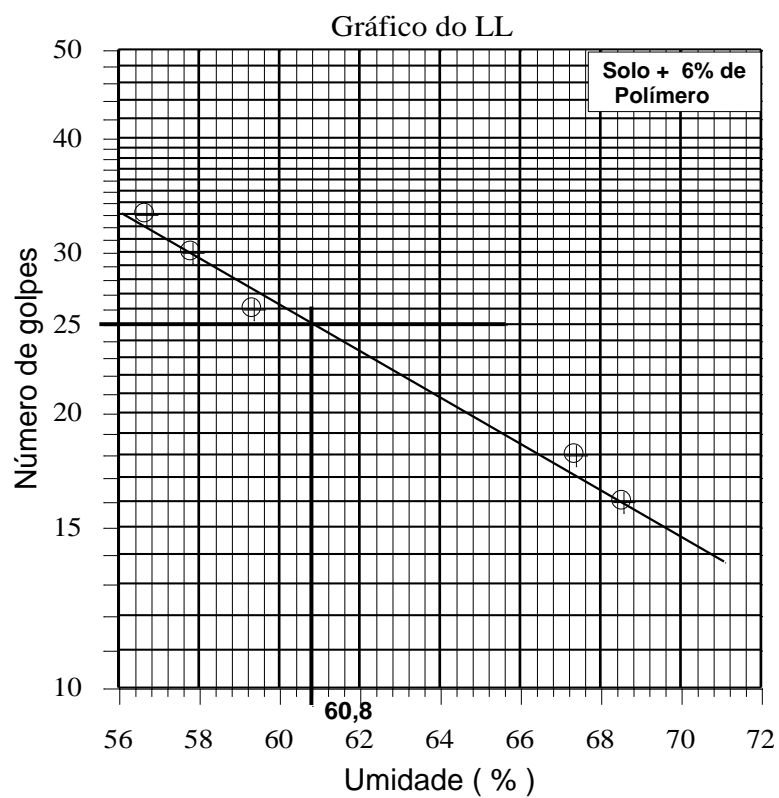
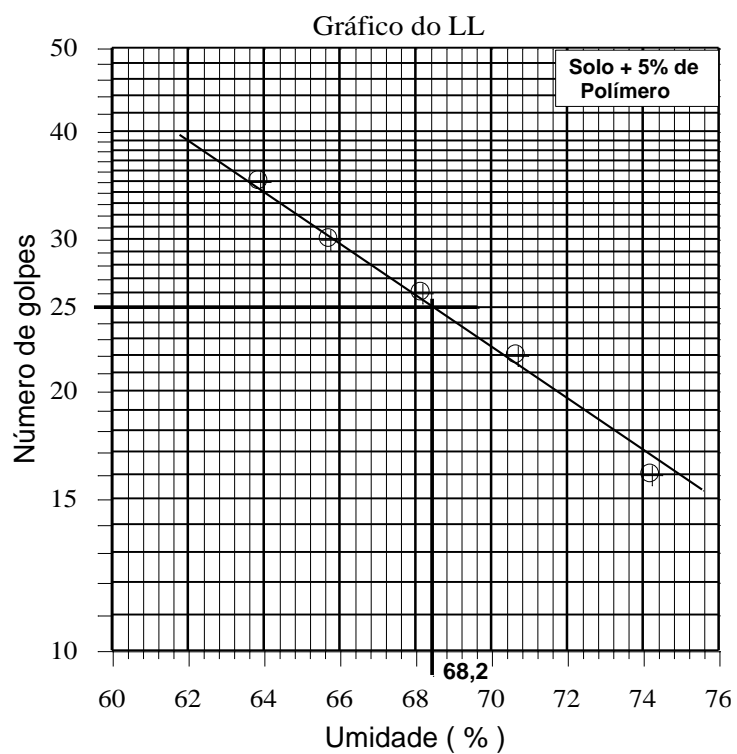
WORRAL, W.E. **Adsorption of Basic Dyestuffs by Clays.** Trans. Brit. Cer. Soc. 57, N° 4, abril. 1958.

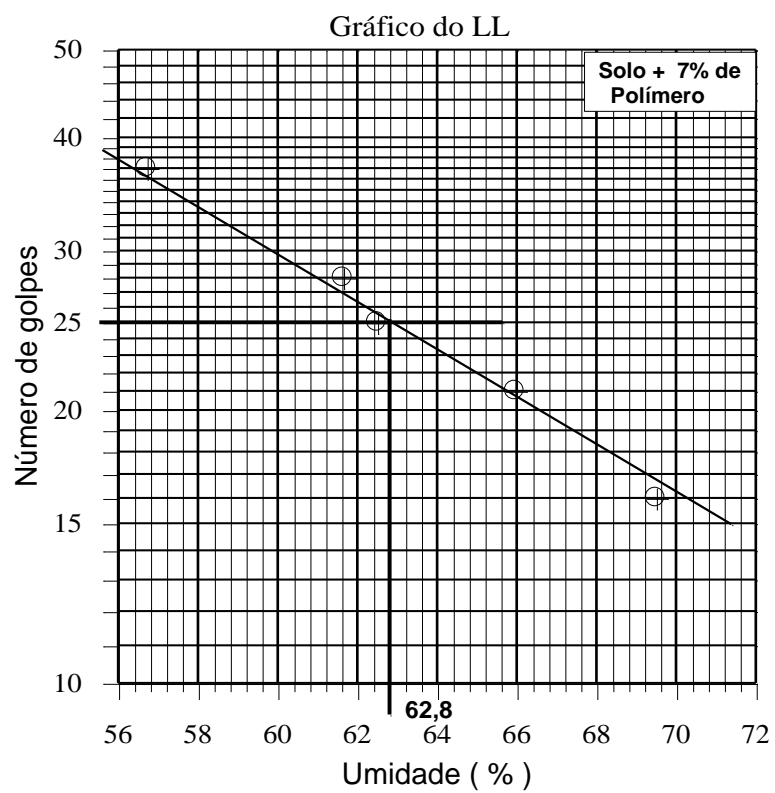
YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O. & WARKENTIN, B. P. **Principles of contaminant transport in soils.** Developments in Geotechnical Enginneering, 73. Elsevier – Amsterdam – London – New York – Tokyo. 1992.

APÊNDICES

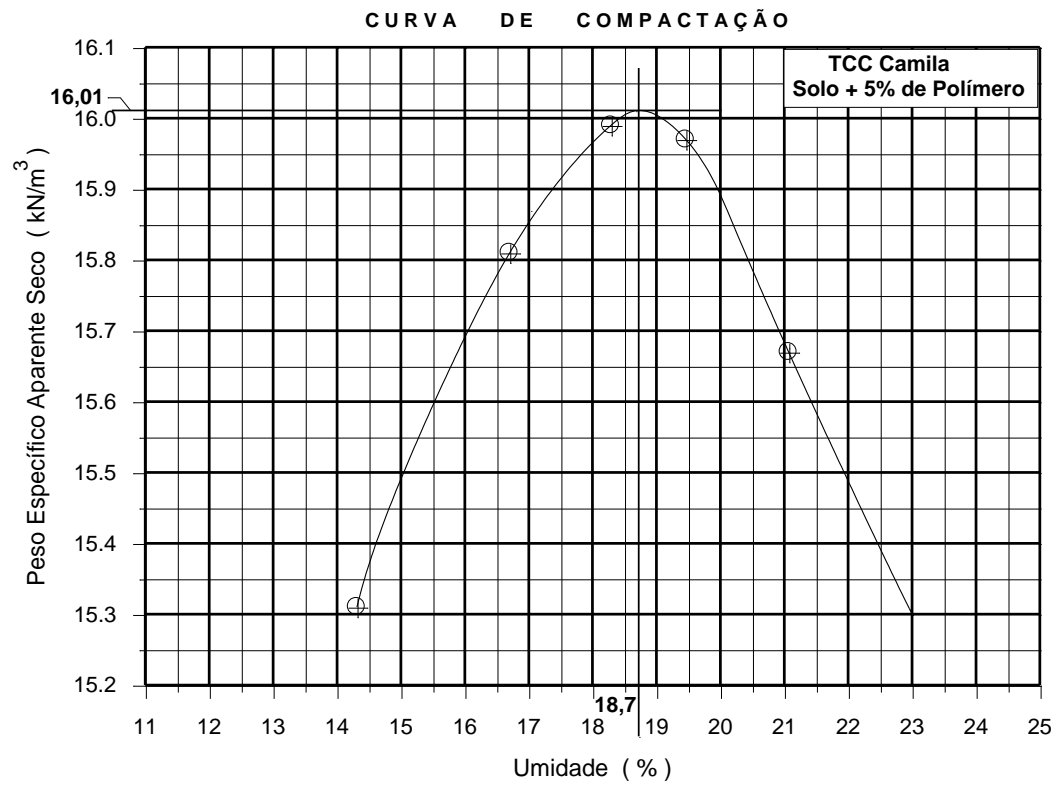
APÊNDICE A – Gráficos de Limite de Liquidez

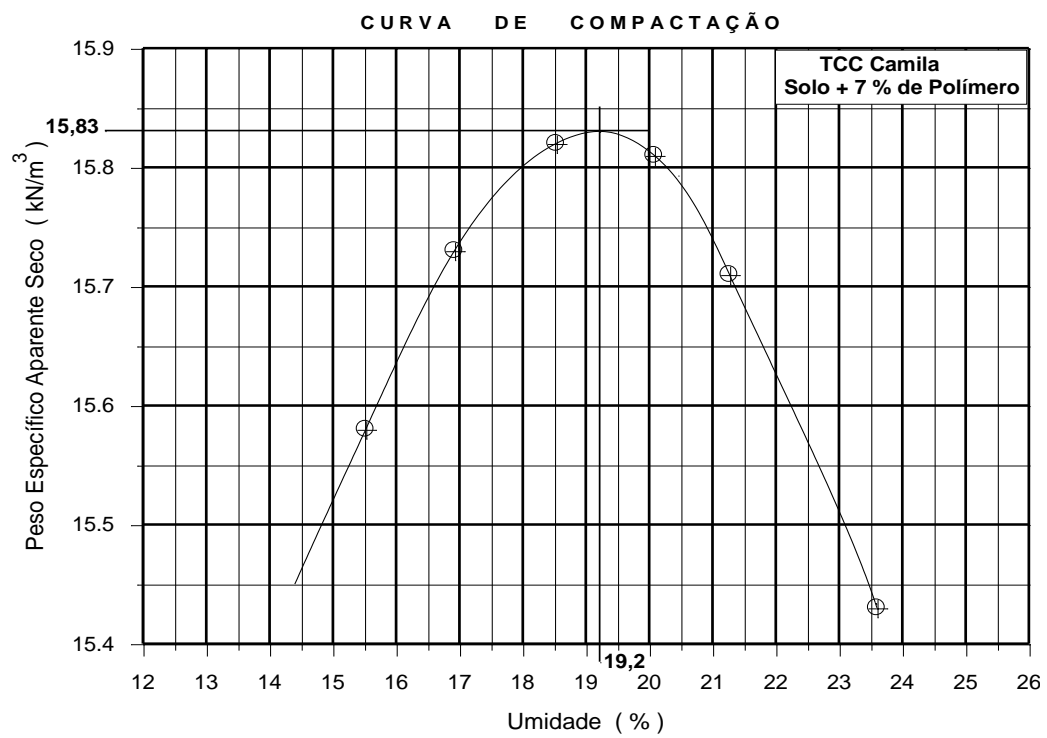
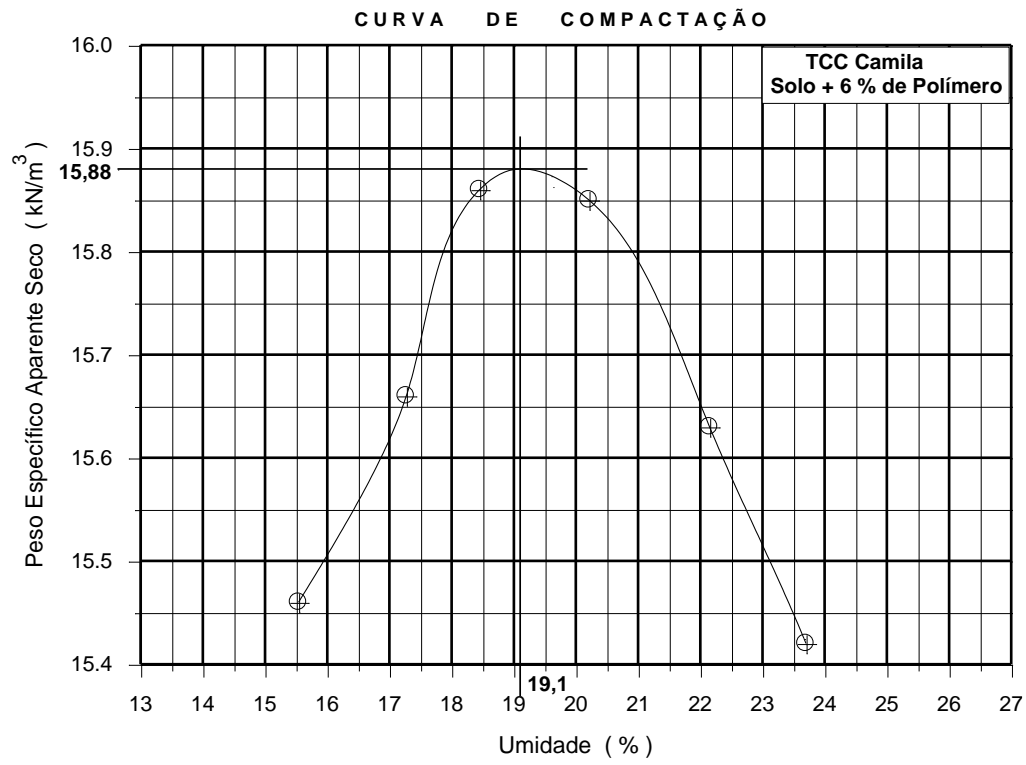






APÊNDICE B – Curvas de Compactação





APÊNDICE C – Curvas de Resistência à Compressão Simples

